

21世紀量子ビーム科学を開拓する 超伝導高周波加速空洞

-Superconducting RF Cavity Opening
the 21st Quantum Beam Science-

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設,
東京大学大学院 ICEPP
齋藤 健治

概要

リニアコライダー、X線自由電子レーザー、放射性核破砕消滅処理など基礎科学から原子力工学まで、21世紀の量子ビーム科学を開拓する超伝導高周波加速空洞を紹介する。この技術は電磁気学や高周波技術・材料科学・化学・表面科学・真空・極低温技術など広範囲な分野を包含する。ここでは超伝導空洞製作のために必要な超伝導の知識からニオブ材の製造、空洞設計、空洞製作法、性能測定法、空洞性能を阻む諸要因空洞表面処理などについて講義する。

目次

1. 超伝導空洞の応用	p.001 – p.120
2. SRFのための超伝導の基礎知識	p.121 – p.171
3. 高純度ニオブ材の製造法	p.172 – p.234
4. SRF空洞の設計法	p.235 – p.316
5. SRF空洞の製作法	p.317 – p.359
6. SRF空洞の性能測定法	p.360 – p.387
7. SRFニオブ空洞の性能制限要因	p.388 – p.446
8. ニオブ超伝導空洞の表面処理法	p.447 – p.512
9. ニオブ超伝導空洞性能への水素の影響	p.513 – p.533
10. 超伝導空洞のクリーン組立	p.534 – p.552
11. 高電界ニオブ空洞の開発	p.540 - p.558 p.553 – p.570
12. ILCに向けたKEK WG5のR&D戦略	p.571 – p.689
13. コスト削減	p.690 – p.760

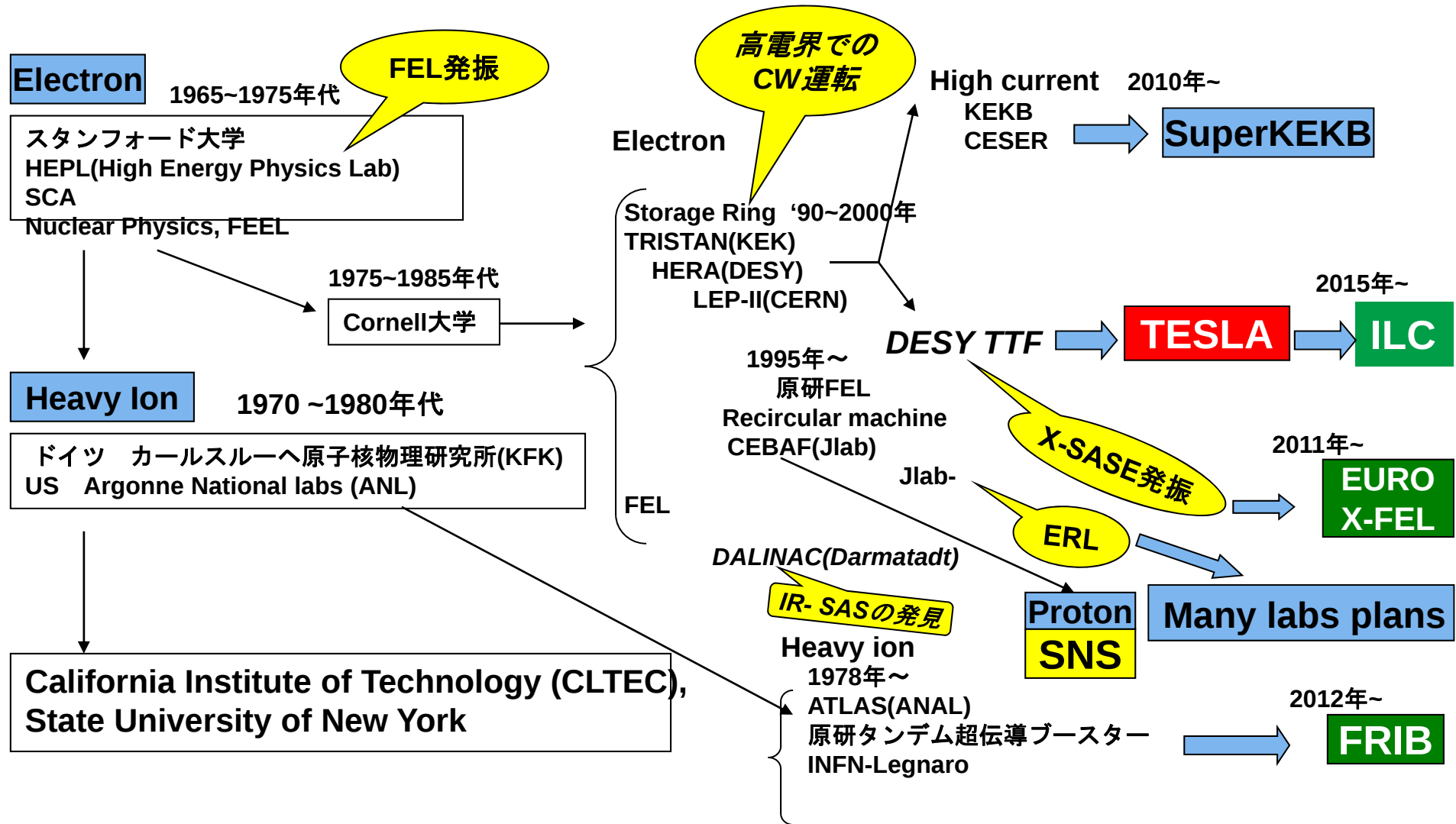
1. 超伝導加速空洞の応用

1.1 原子核・高エネルギー加速器

1.2 新しい放射光源

1.3 陽子・重イオン加速器

What about the Future ?



1.1 原子核物理・高エネルギー物理 への応用

原子核・素粒子の復習
— 加速器からは多少脱線するが —

ミクロの世界をのぞくには

対象物の大きさ程度の波長の
ド・ブロイ波(物質波)を当てる

$$W = \sqrt{(m_0 c^2)^2 + p^2 c^2} = m_0 c^2 + T,$$

$$p^2 = 2m_0 \cdot T + \frac{T^2}{c^2},$$

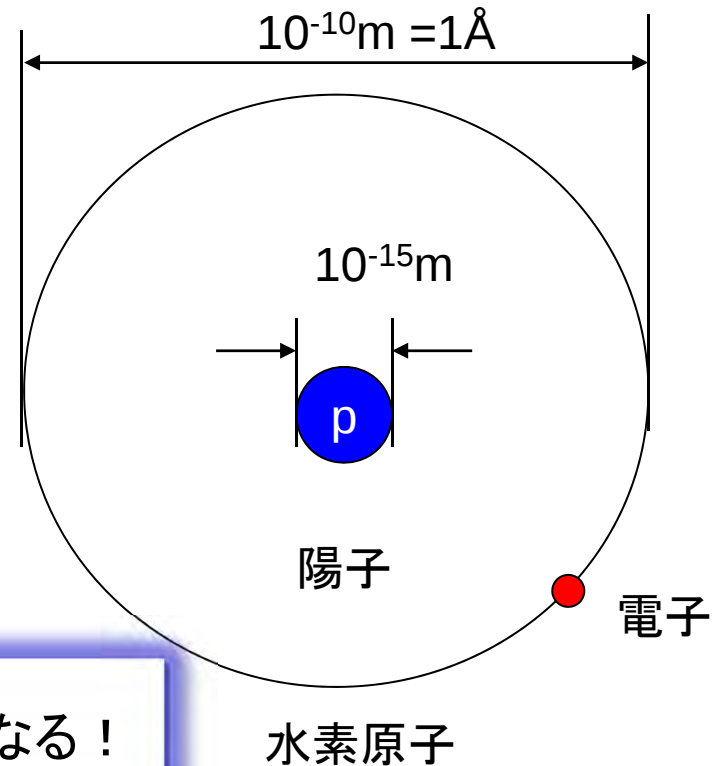
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{T \cdot (1 + 2m_0 c^2 / T)^{\frac{1}{2}}}$$

電子を衝突させる場合

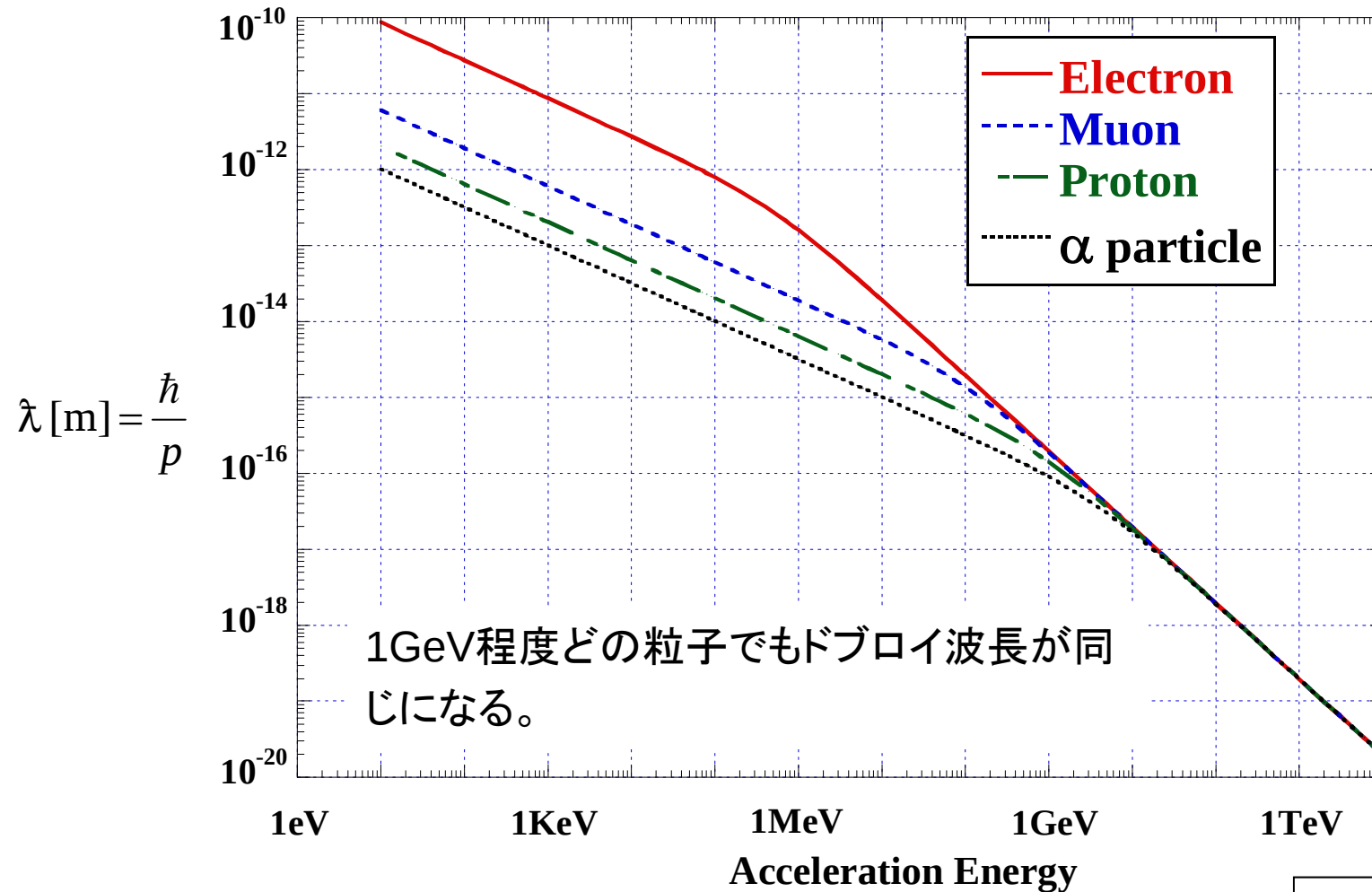
$$\approx \frac{200}{T(\text{MeV})} (fm = 10^{-15} m)$$

荷電粒子を加速する装置:加速器が必要となる！

核子の構造を調べるには、
200MeV以上の高エネルギー
電子散乱実験が必要



加速エネルギーに対するドブロイ波長を計算しよう

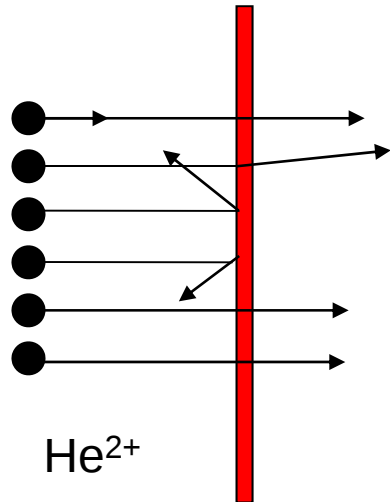


自分で計算してみる事: 演習問題1

原子核物理の復習

Rutherfordの実験

1908年ノーベル化学賞



金箔

1911 Rutherford
原子は芯を持つ構造

↓
原子核の存在

1913
Bohrの有核原子模型

↓
1928 量子力学の形成

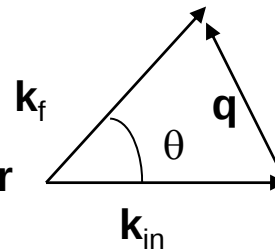
弾性電子散乱 Hofstadter 1961年ノーベル賞

$$\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} = \left(\frac{Ze^2 \cos(\frac{\theta}{2})}{2E_e \sin^2(\frac{\theta}{2})} \right)^2 |F(\mathbf{q})|^2,$$

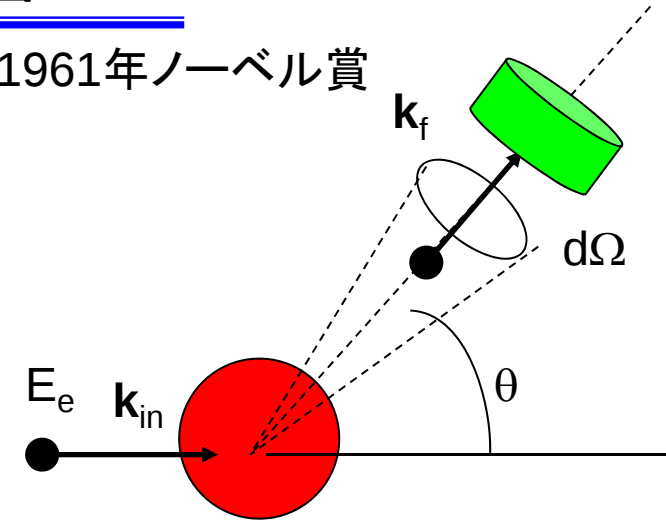
$$F(\mathbf{q}) = \int \rho(\mathbf{r}) e^{i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}} d\mathbf{r},$$

$$\mathbf{q} = \mathbf{k}_f - \mathbf{k}_{in},$$

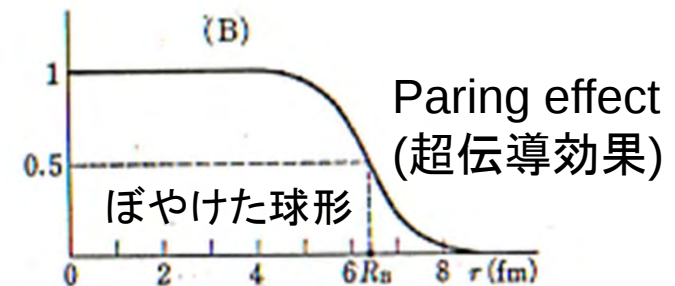
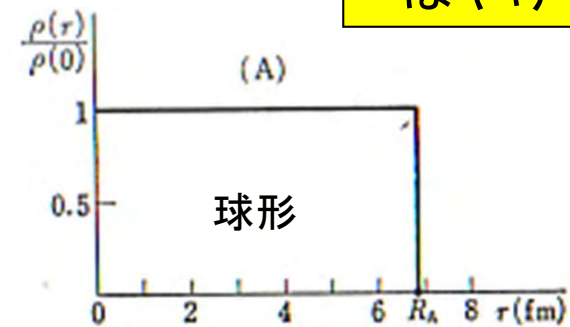
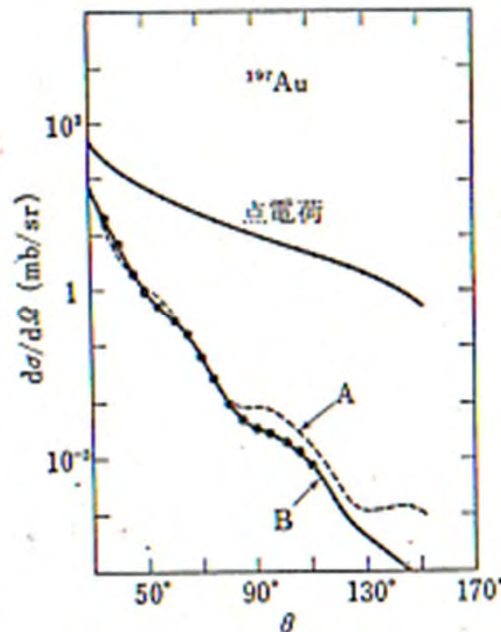
Momentum transfer



$$q = |\mathbf{q}| = 2k \sin \frac{\theta}{2} = \frac{2E_e}{\hbar c} \sin \frac{\theta}{2}$$



原子核表面は
ぼやけている



原子核〔少数多体問題〕はどう理解されているか

- 独立粒子模型

平均場の中で個々の核子が独立に運動する。

井戸型ポテンシャル、ウッズ・サクソンポテンシャルの中で自由に動く。

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 + V(r) \right] \psi(r) = E \psi(r)$$

殻模型

マジックナンバー: ”陽子数あるいは中性子数が、 $N=2, 8, 20, 28, 50, 82$ および126の時、原子核が非常に安定”を見事に説明できる。

軌道・スピン相互作用 $L \cdot S$ 力の導入(Mayer, Jensen)

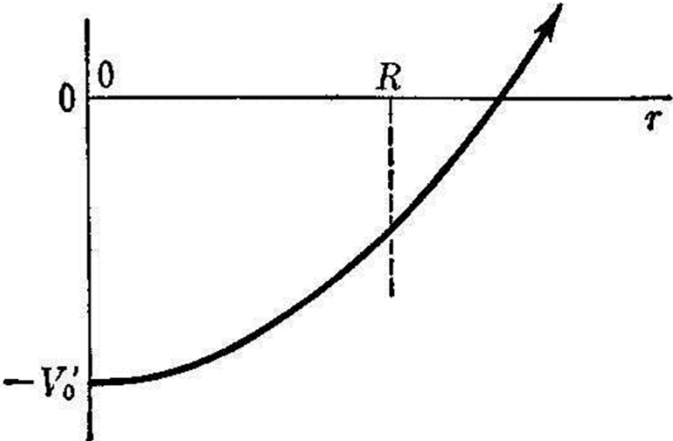
$$V = V(r) + 20A^{-2/3} \mathbf{l} \cdot \mathbf{s} \quad A: \text{核子数}$$

- 残留相互作用

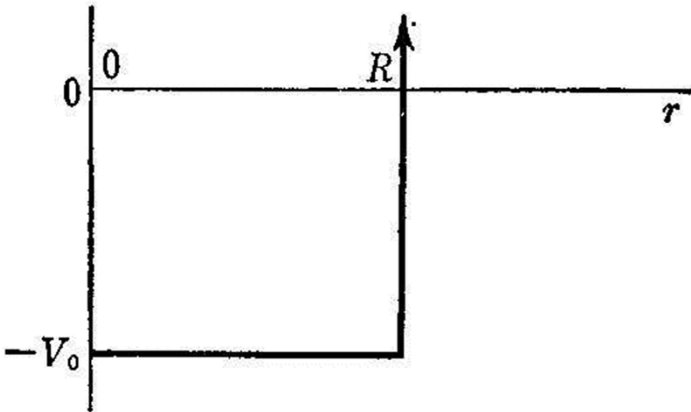
平均場近似で組み込めない部分は、残留相互作用として取り入れる。

$$V(r) = V(r) + 20A^{-2/3} \mathbf{l} \cdot \mathbf{s} + V(\sigma) \sigma_p \cdot \sigma_n + V(\tau) \tau_1 \tau_2 + V_T(r) \cdot S_{pn} + \dots$$

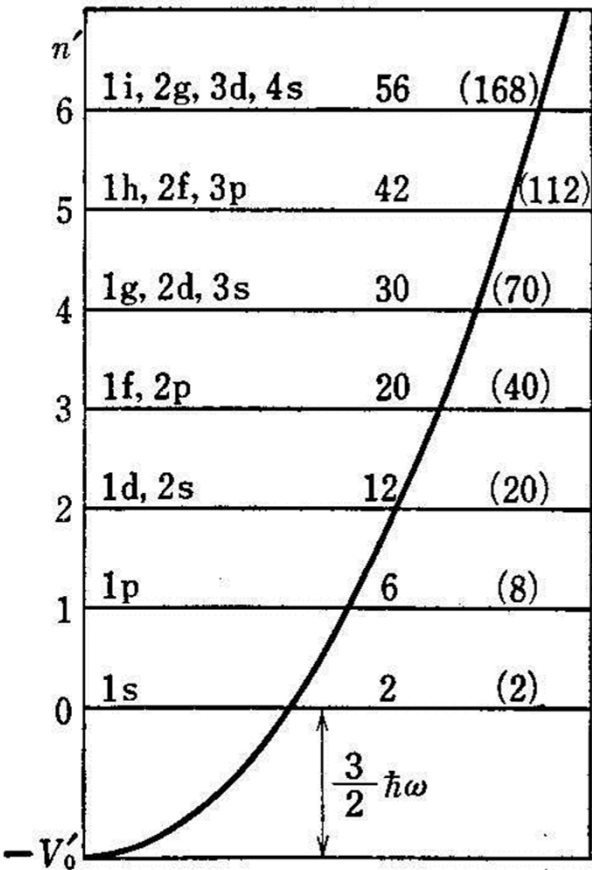
独立粒子模型による原核構造の大雑把な理解



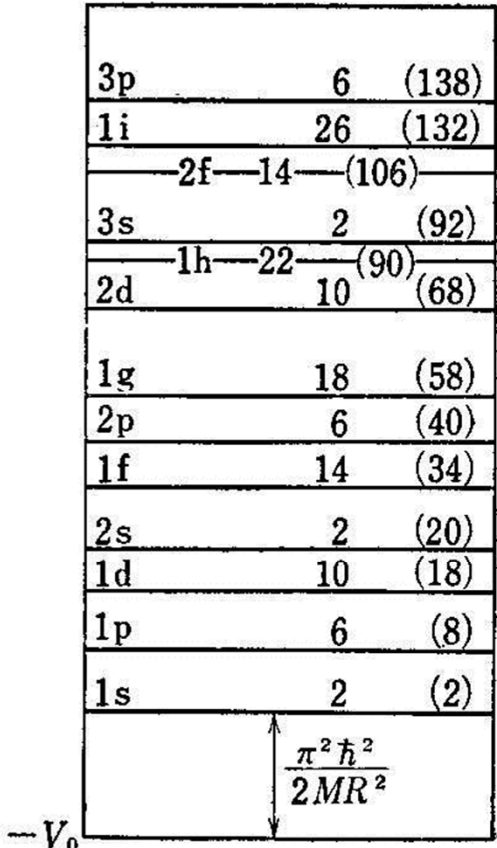
(a) 調和振動子ポテンシャル



(b) 井戸形ポテンシャル



(a)



(b)

図 62 3次元調和振動子ポテンシャル (a) と無限に高い井戸形ポテンシャル (b) の準位構造 (中央の数値はその準位にはいりうる核子数, () は核子数の和)

原子核のマジックナンバーとLS力の検出

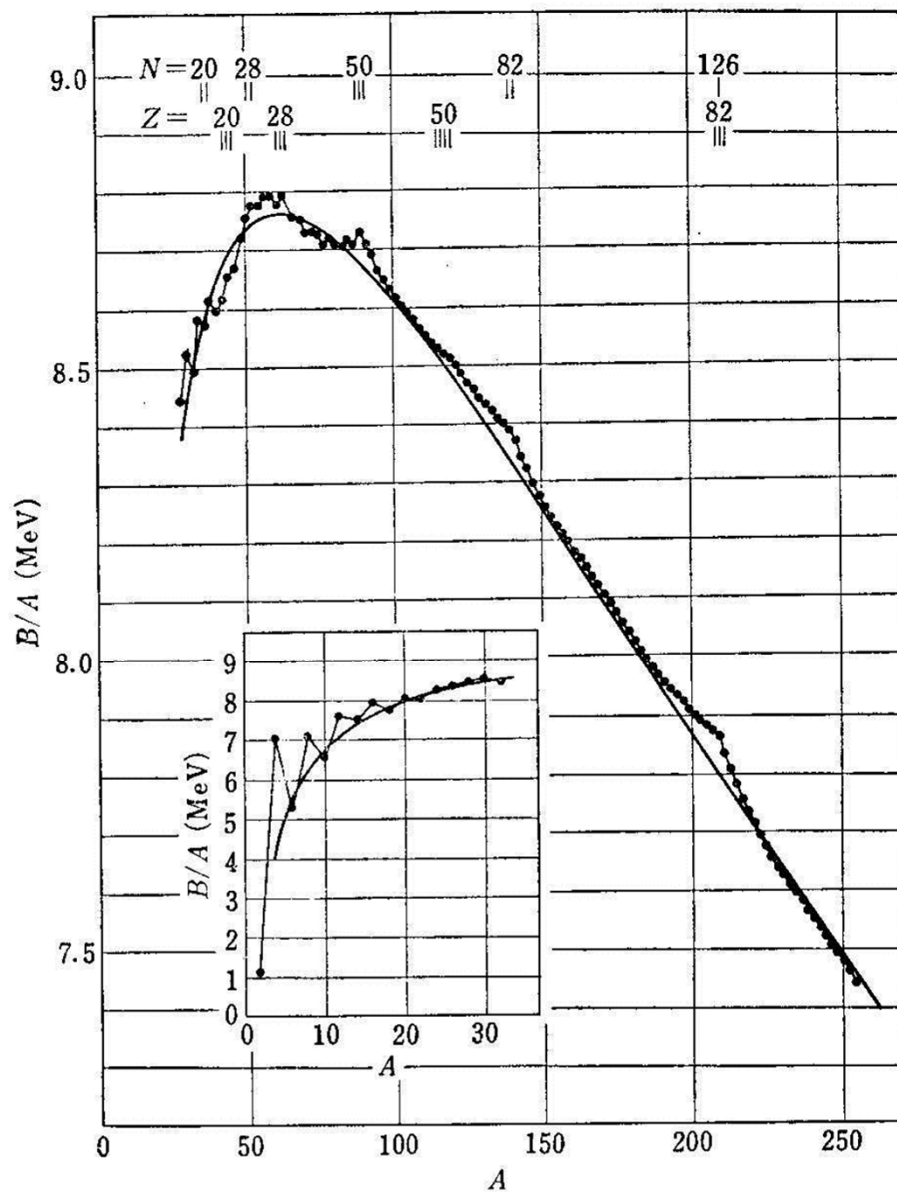


図 4 安定核の B/A と A の関係
(曲線は (15.9) 式による)

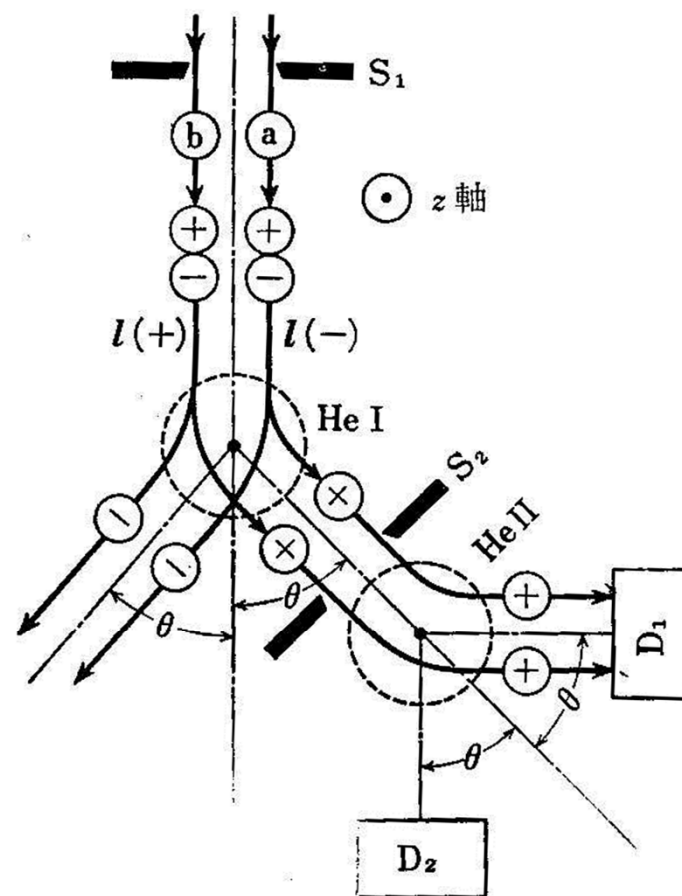
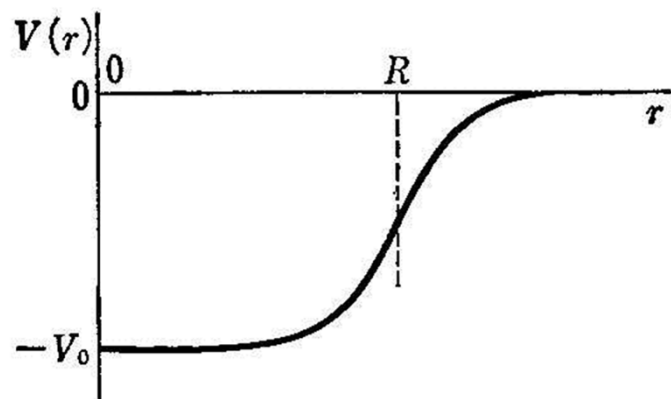


図 64 かたよりのない陽子ビームの ^4He 核による 2 回散乱 (散乱平面内)
(破線の円形は $V_{so} = v(r)l \cdot s$ の作用範囲 ($v(r) < 0$). + は s および l の上向き (+ z 方向), - は下向きを示す. $S_{1,2}$ はスリット, $D_{1,2}$ は陽子検出器)

L・S力導入によるマジックナンバーの導出



(a) ウッズ・サクソンポテンシャル (10.4) 式

$$V(r) = \frac{-V_0}{1 + \exp\{r - R/a\}}$$

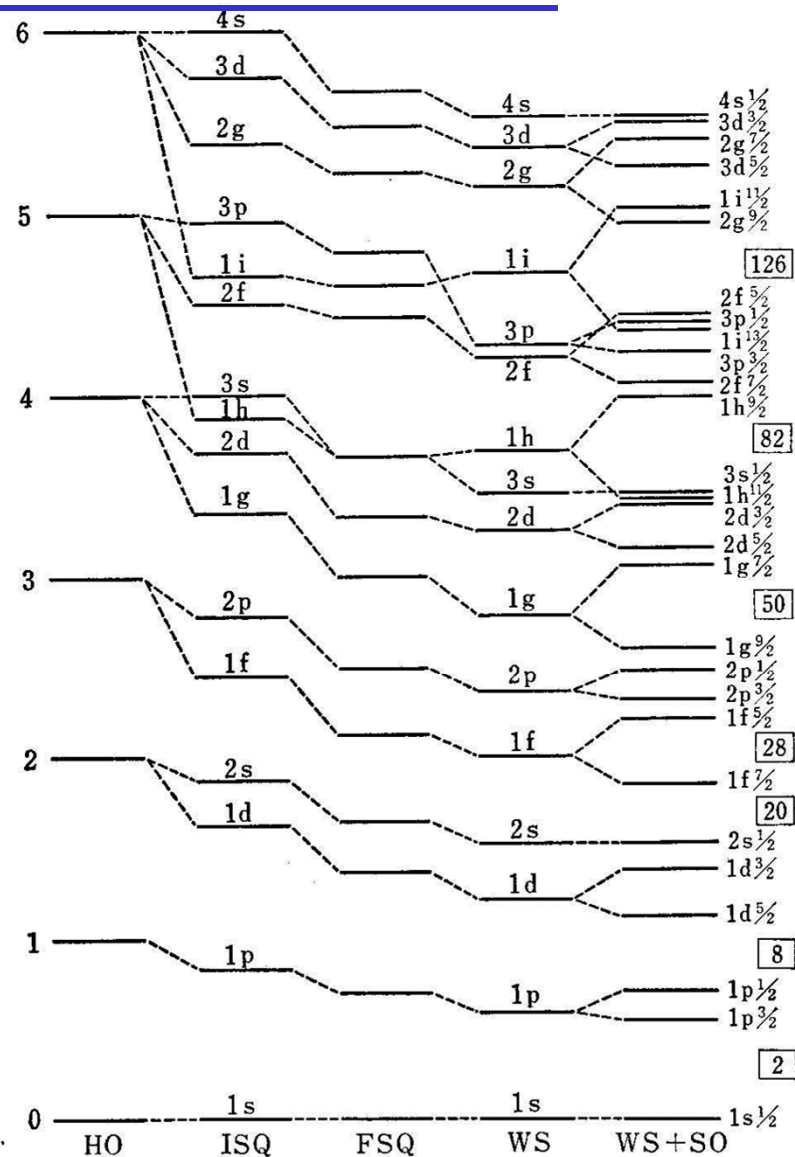
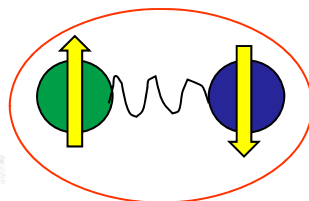


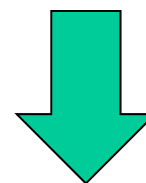
図 63 各種の1体ポテンシャルによるエネルギー準位(HOは調和振動子形, ISQは無限に高い井戸形, FSQは有限の深さの井戸形, WSはウッズ・サクソン形, WS+SOはWSプラススピン軌道結合ポテンシャル)

Paring相互作用



超伝導のクーパーペアのアナロジー

2個の核子が
 $|\pi=0^+$
に結合する引力相互
作用



奇数核が不安定。

U238は安定核、U235は
核分裂を起こす。

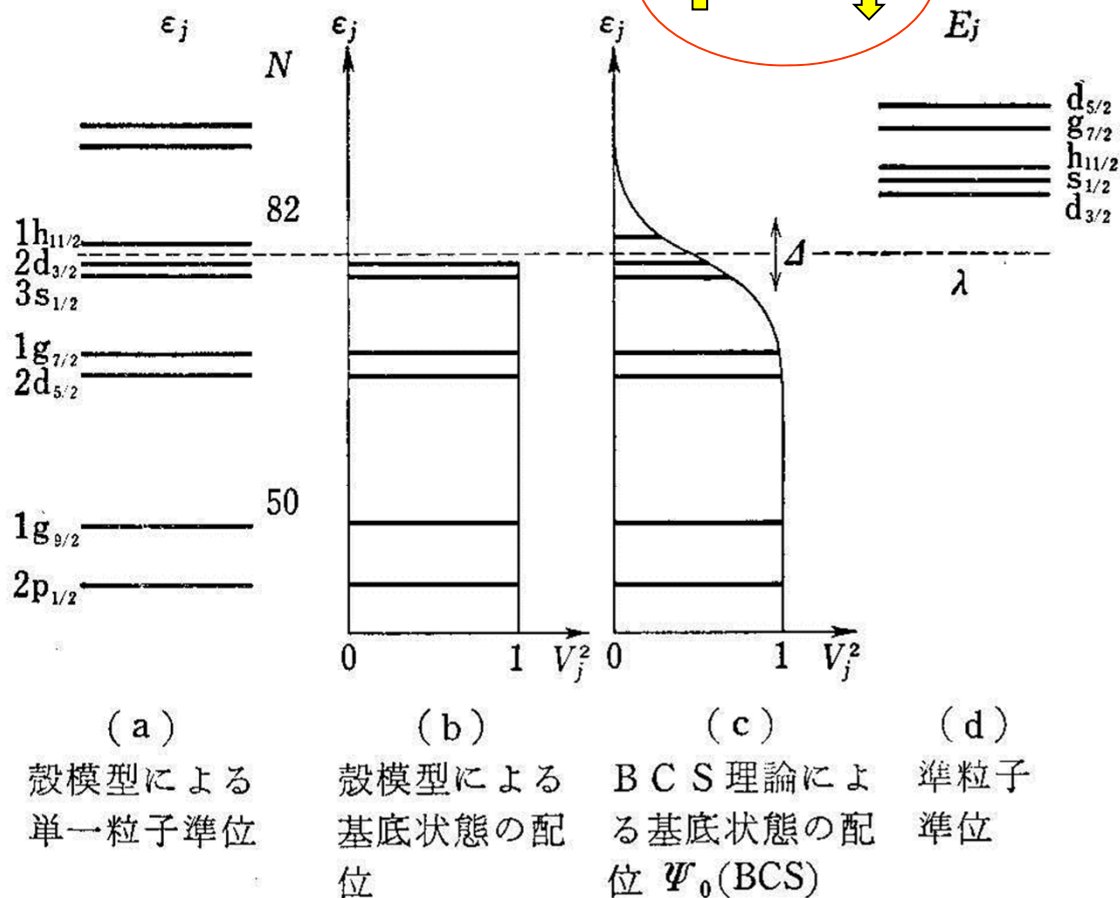


図 71 殻模型から準粒子模型へ, ^{120}Sn の例

U235の核分裂反応

自然界にU235が0.7%存在する。
3~4%に濃縮して核燃料に使う。

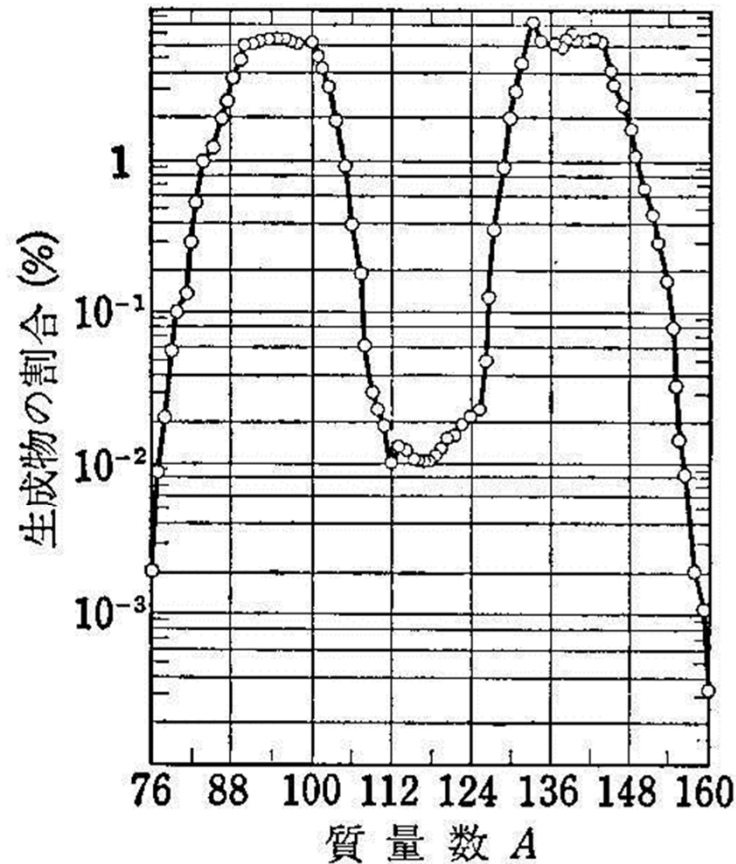
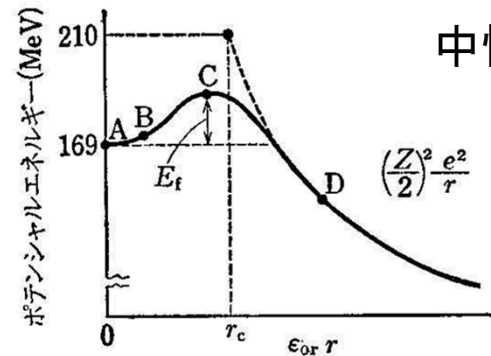
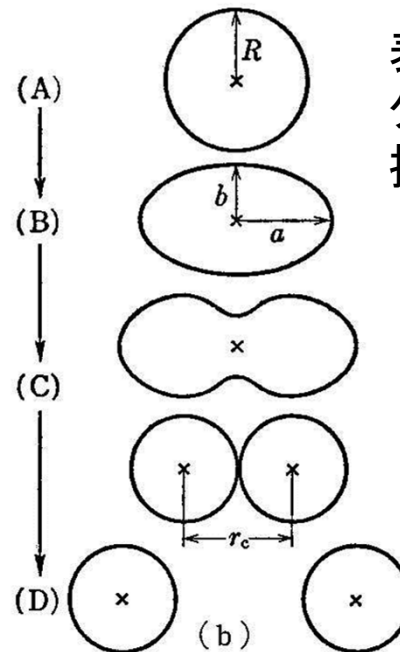


図 172 遅い中性子による ^{235}U 分裂生成物の質量分布



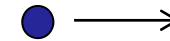
(a)



(b)

図 175 ^{236}U の変形に対するポテンシャルエネルギーの変化 (ただし図 177 の脚注参照)

中性子



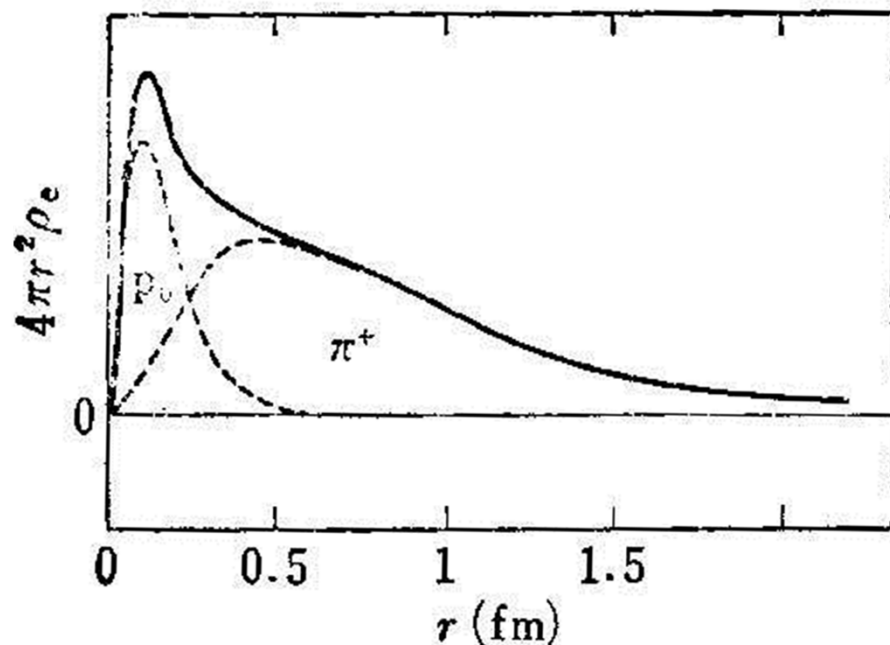
U235



U236

表面張力エネルギー(引力)とクーロンエネルギー(斥力)の損得勘定で核分裂を起こす。

原子核と高エネルギー物理

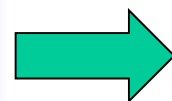


陽子には、芯がある。
パートン模型(ファイマン) 1960年代

図 49 陽子の電荷分布

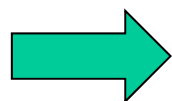
今後の原子核物理の展開

クォークの自由度を入れた
原子核模型の構築



高エネルギー電子加速器
CEBAF (Jlab)

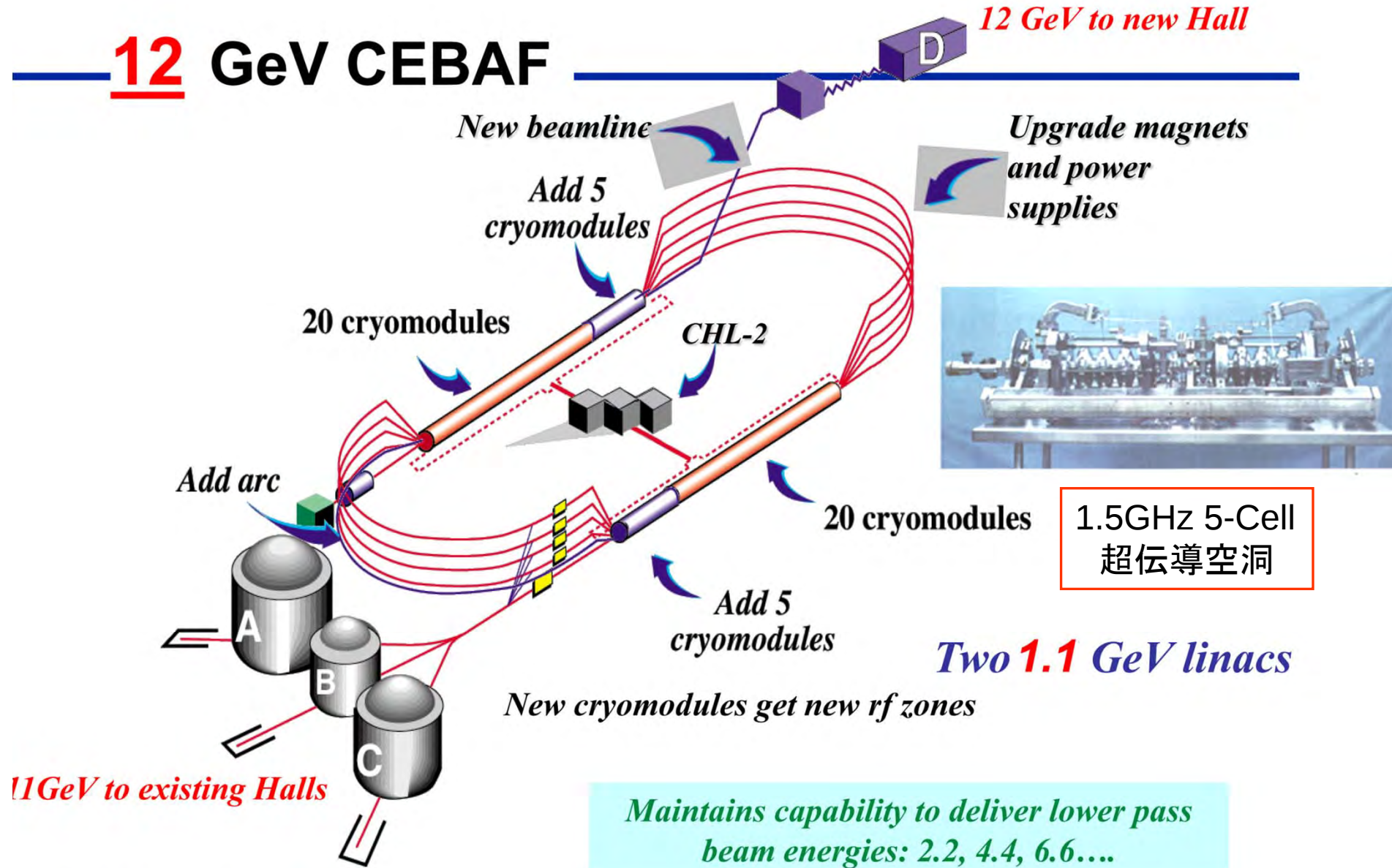
Rare isotopeの生成
宇宙物質誕生の謎を解明



理研、ミシガン州立大学FRIB

12 GeV CEBAF

12 GeV to new Hall



JEFFERSON LAB TODAY



>1300 active member international user community engaged in exploring quark-gluon structure of matter.

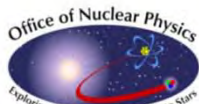
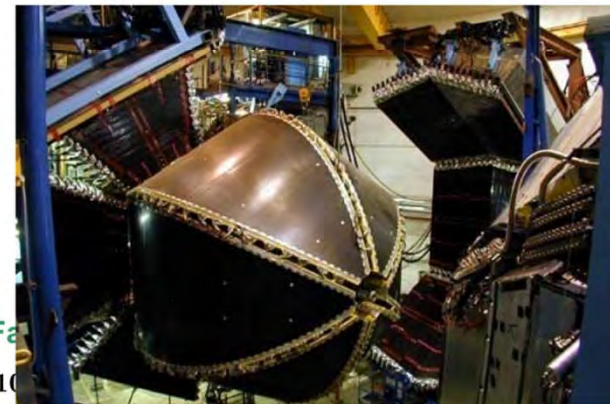


Superconducting electron accelerator provides 100% duty factor beams of unprecedented quality, with high polarization at energies up to 6 GeV.

Newport News, VA



CEBAF's delivery of beam with unique properties to three experimental halls simultaneously. Each hall offers complementary capabilities.



Thomas Jefferson National Accelerator Facility

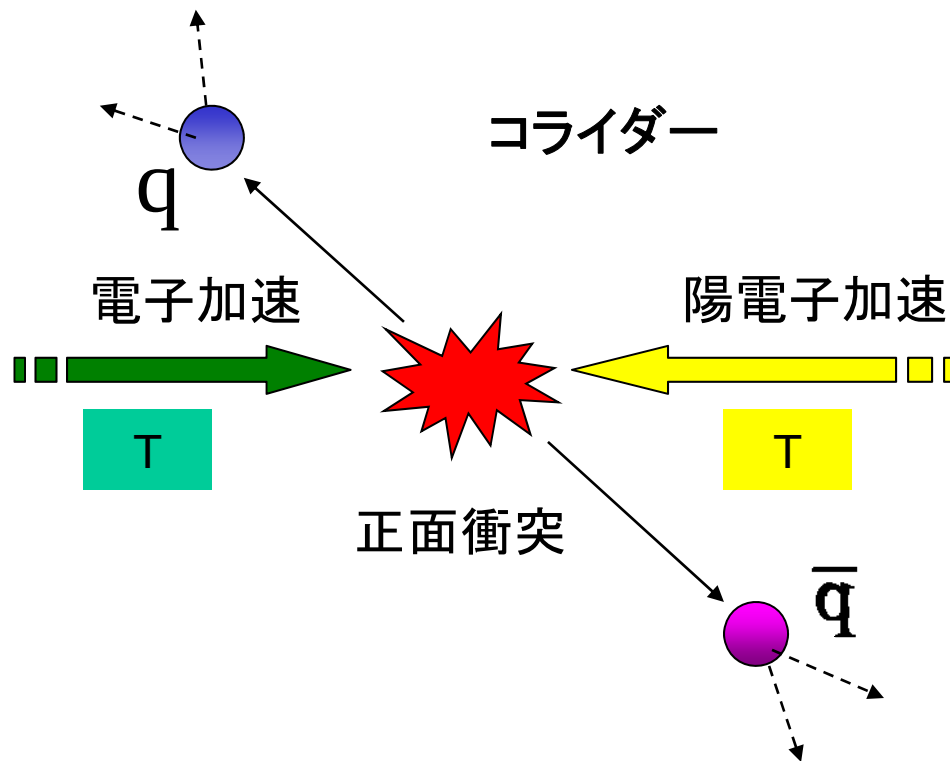
Page 3

TTC 4/19/10

高エネルギー物理

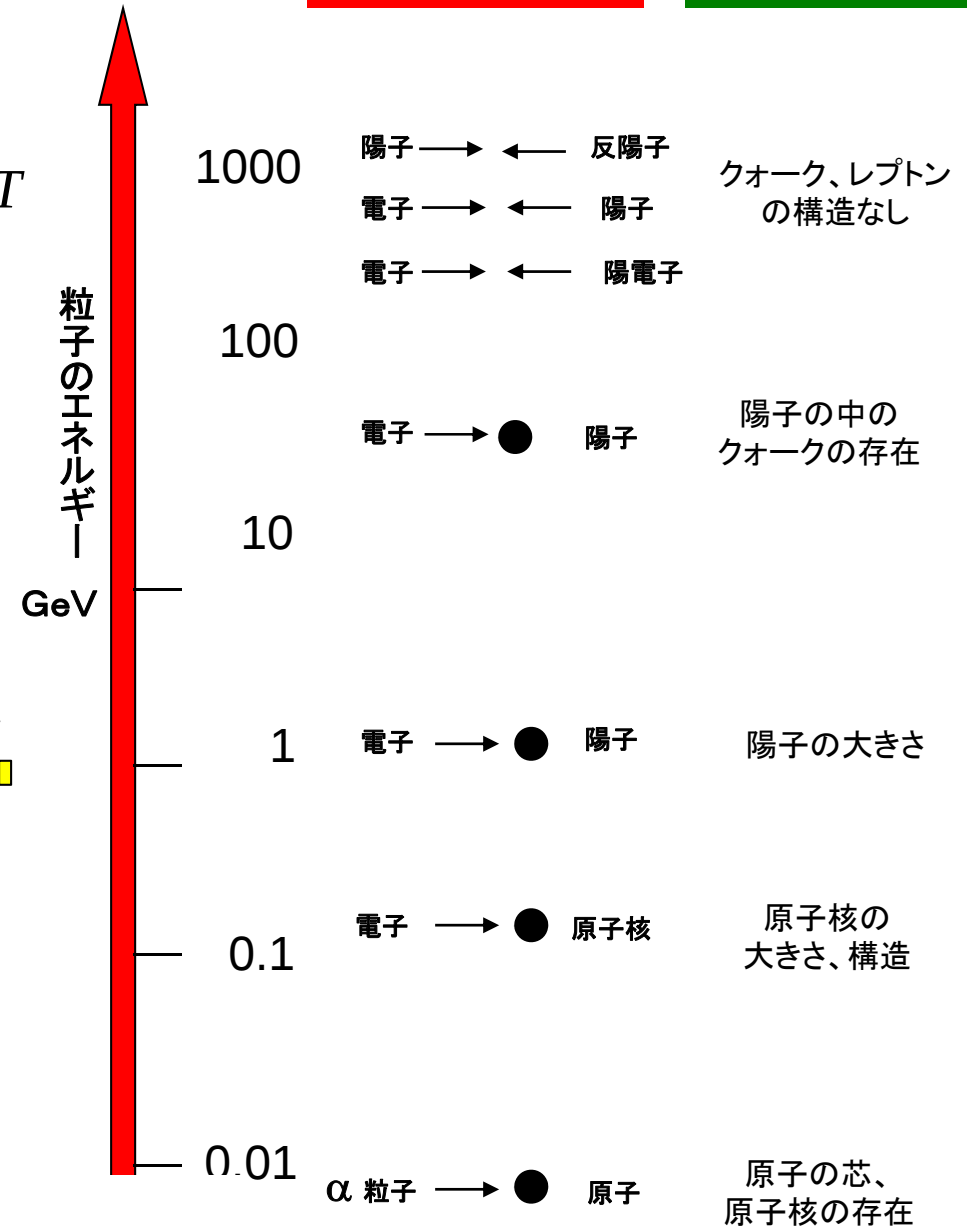
相対性理論: $E=mc^2$

$$mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} = m_0 c^2 + T$$



使用した衝突反応

分かったこと



世界の加速器

電子・陽電子型					
加速器	研究所	加速粒子	エネルギー[GeV]	完成年	成果
SPEAR	SLAC(米国)	$e^+ + e^-$	4 + 4	1972	J/ψの発見、Richiterノーベル賞 Tau neutoriの発見、Redermannノーベル賞
DORIS	DESY(ドイツ)	$e^+ + e^-$	5.5 + 5.5	1974	
CESR	Cornell(米国)	$e^+ + e^-$	8 + 8	1978	
PETRA	DESY(ドイツ)	$e^+ + e^-$	22 + 22	1979	
TRISTAN	KEK(日本)	$e^+ + e^-$	32 + 32	1989	超伝導加速空洞の世界初の実用化
SLC	SLAC(米国)	$e^+ + e^-$	50 + 50	1987	Z ₀ 粒子の生成、標準モデルの検証
BEPC	IHEP(中国)	$e^+ + e^-$	2.3 + 2.3	1989	
LEP	CERN(スイス)	$e^+ + e^-$	50 + 50 105 + 105	1989 1999	Z ₀ 粒子の生成、標準モデルの検証 W [±] 粒子の生成
PEP-II	SLAC(米国)	$e^+ + e^-$	3.1 + 9	1999	CP対称性非保存の発見
KEKB	KEK(日本)	$e^+ + e^-$	3.5 + 8	1999	CP対称性非保存の発見
BEPC-II	IHEP(中国)	$e^+ + e^-$		2006	
他種					
ISR	CERN(スイス)	p + p	31 + 31	1971	
SppbarS	CERN(スイス)	p + p bar	315 + 315	1979	Z ₀ , W [±] の発見、Rubiaノーベル賞
Tevatoron	FNAL(米国)	p + p bar	1000 + 1000	1985	Top quark の発見
HERA	DESY(ドイツ)	e + p	30 + 820	1991	Glueon の発見
RHIC	BNL(米国)	Au + Au	100/u + 100/u	1999	
LHC	CERN(スイス)	p + p	7000 + 7000	2010	Higgs、SUZY粒子の探索
J-PARC	原研東海	p	30	2010	T2K実験開始

LEP-II

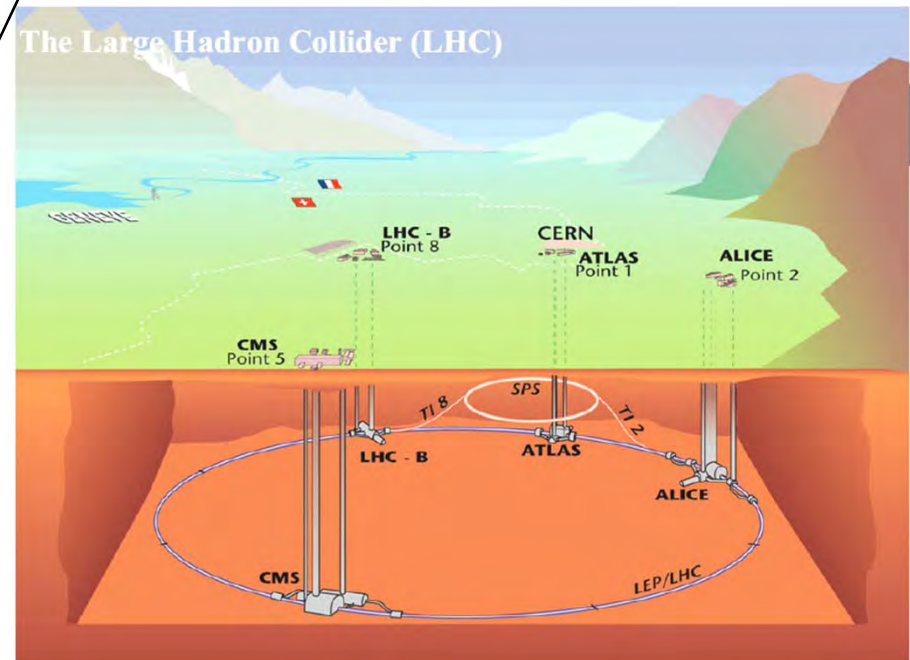


LEP-II @ CERN



Zo factory

ジュネーブ空港



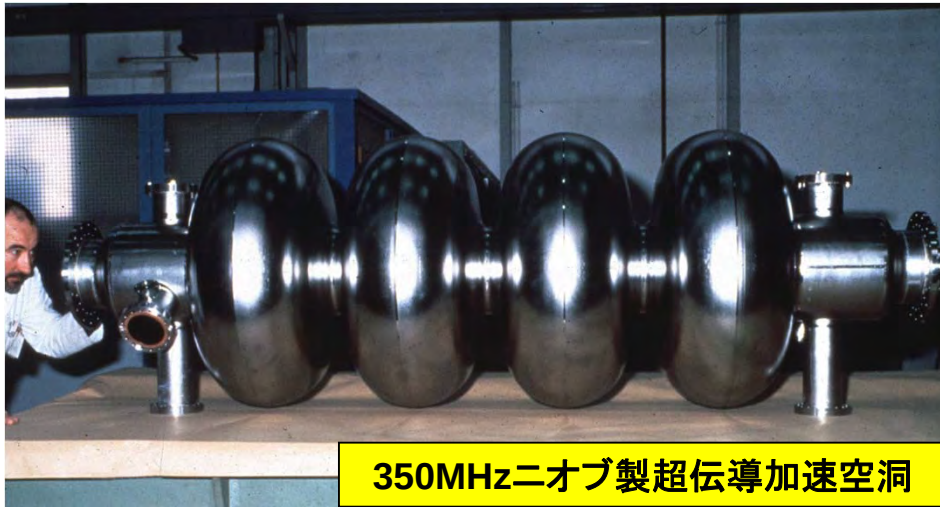
March 27 2001

Luciano MAIANI.CERN

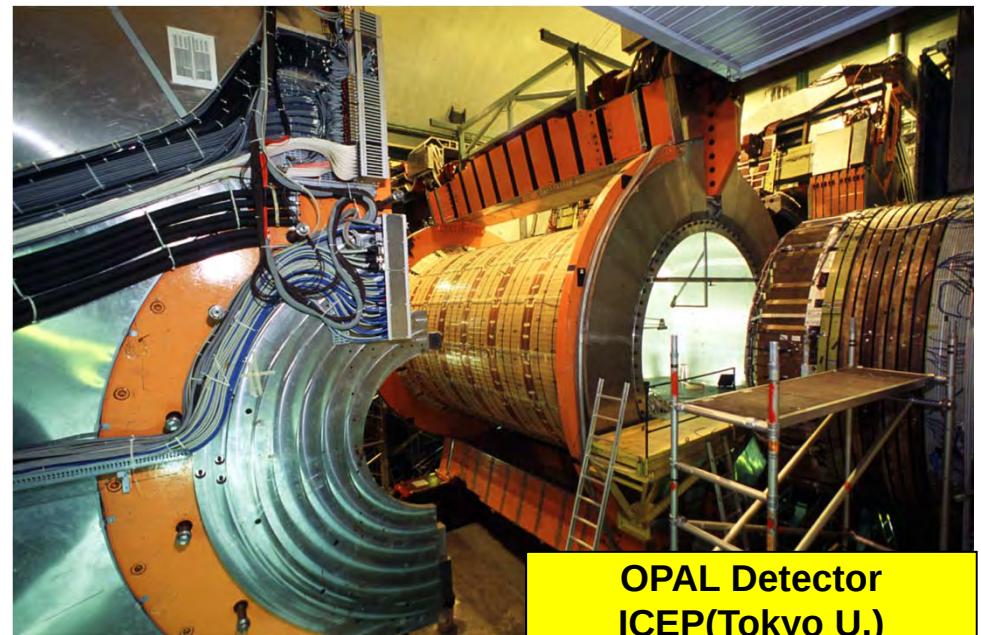
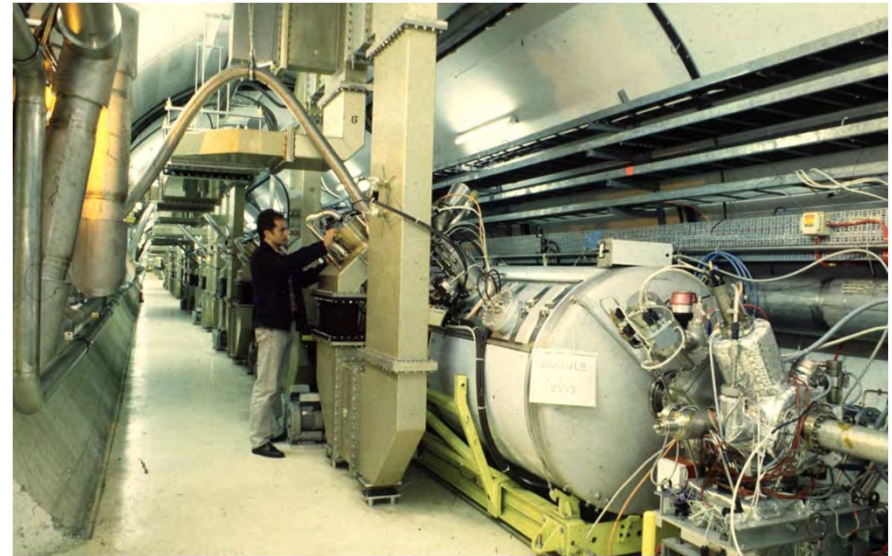
4



LEP-II



350MHzニオブ製超伝導加速空洞

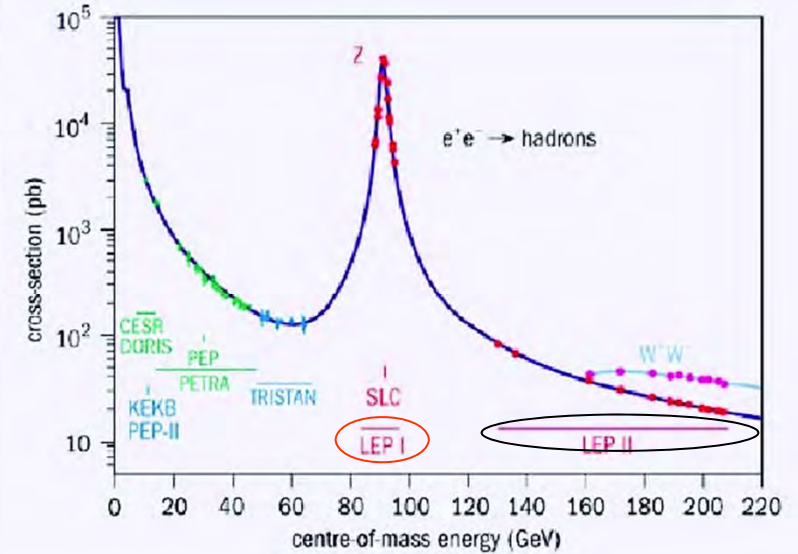
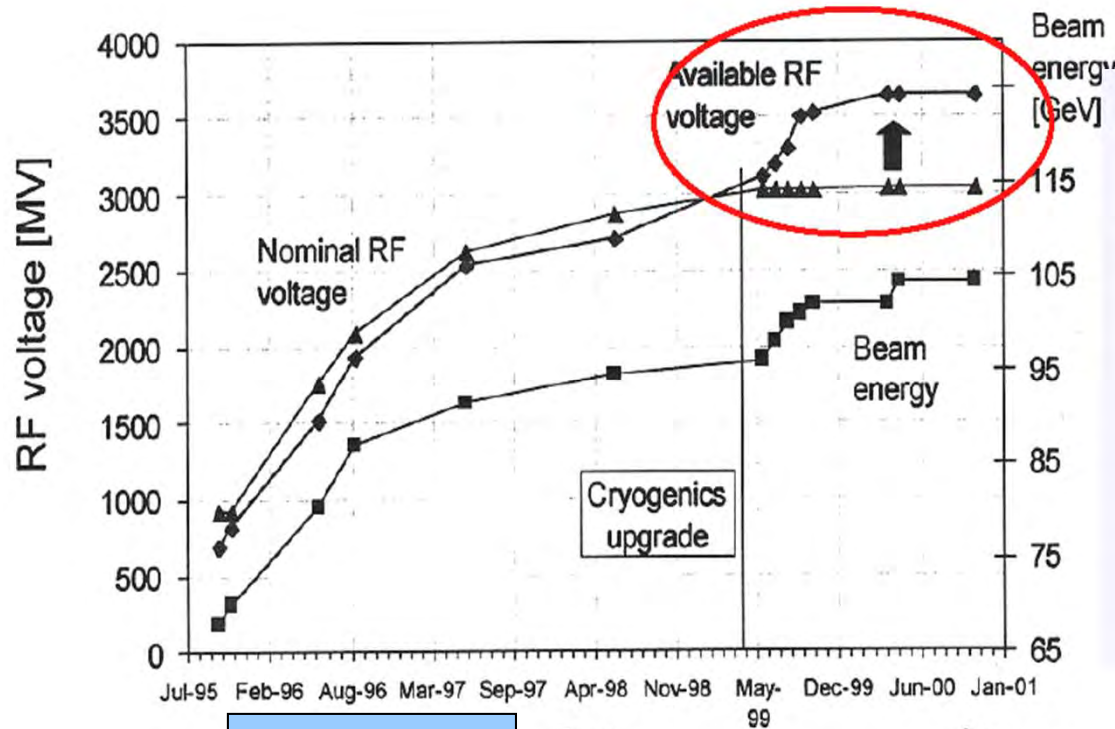


OPAL Detector
ICEP(Tokyo U.)



LEP-II (CERN)

Beam energy 50GeV → 105GeV Energy
超伝導加速空洞



3世代

$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} s \\ c \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} b \\ t \end{pmatrix}$
e	μ	τ
ν_e	ν_μ	ν_τ

Date

R. Heusch

Z_0 factory



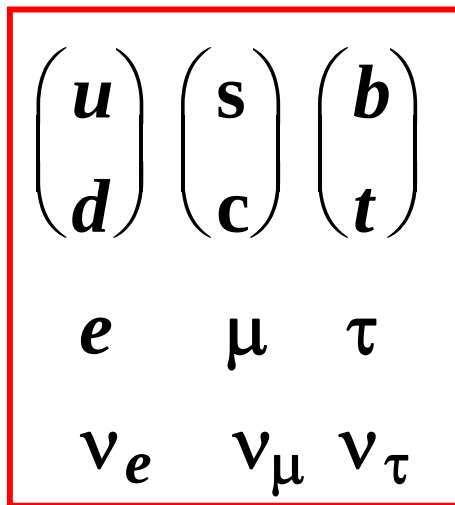
$W^\pm$ production
Higgs search

Higgs > 114GeV

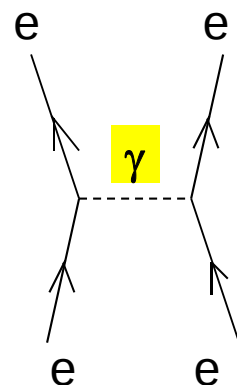


現代素粒子物理の描く力の発生機構

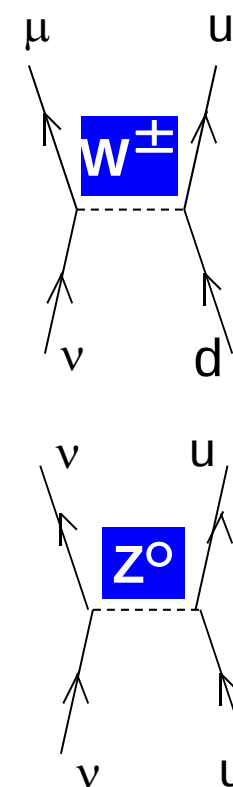
基本粒子と粒子間相互作用



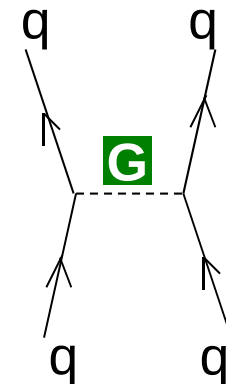
電磁相互作用



弱い相互作用



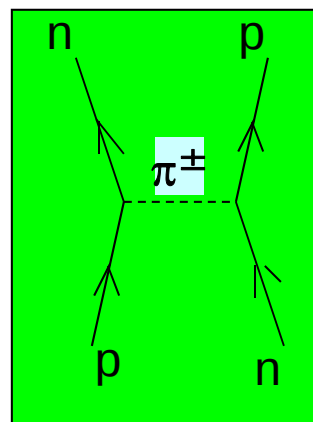
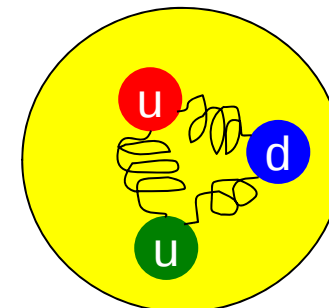
強い相互作用



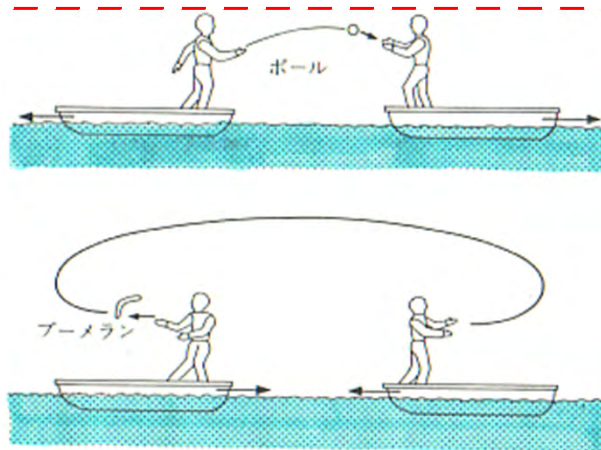
Gauge粒子
Photon(γ), Gluon(G),
Weak Boson(W,Z)

Higgs
mechanism

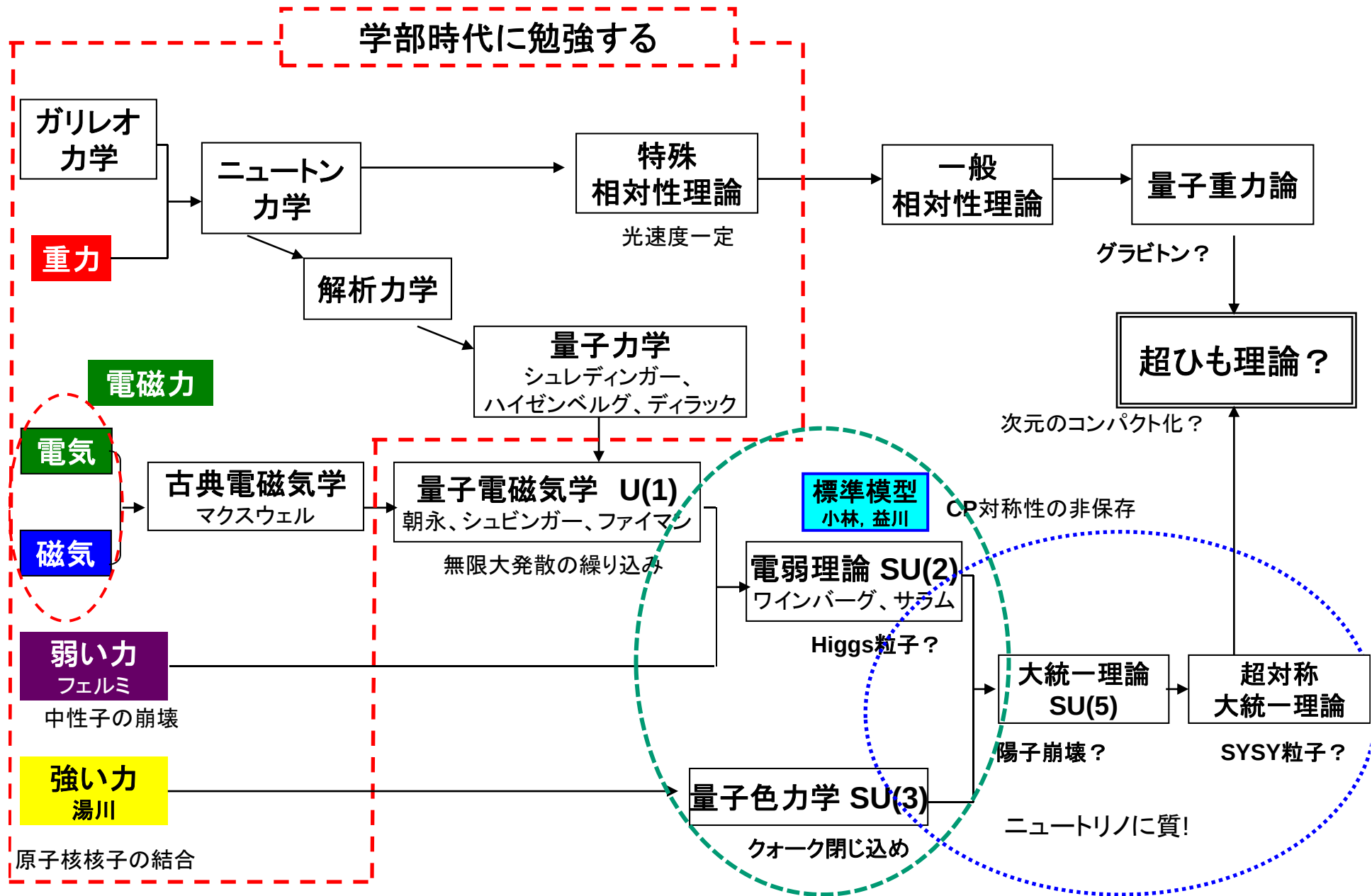
Proton



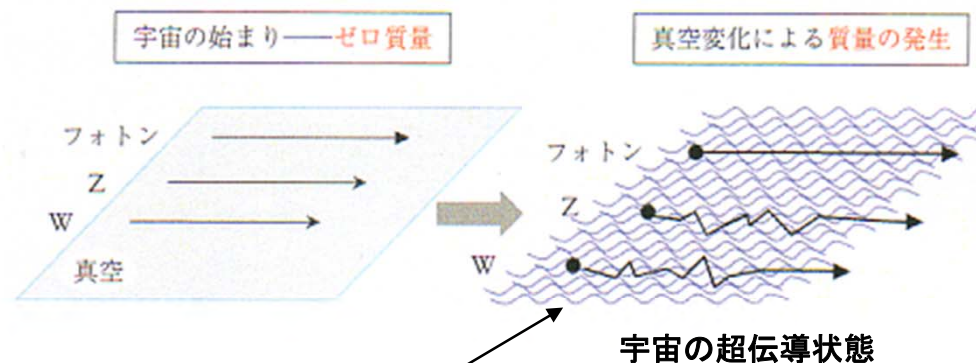
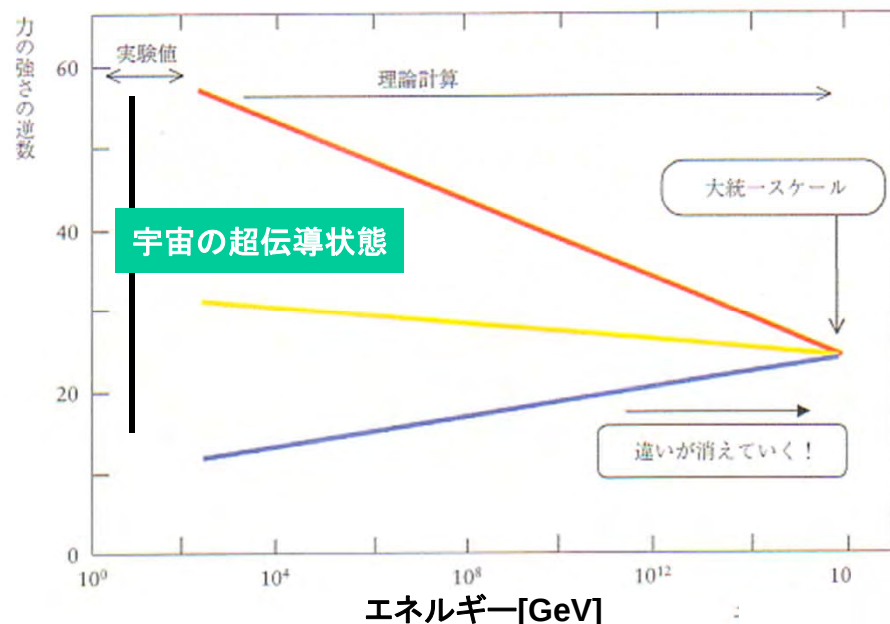
湯川型相互作用



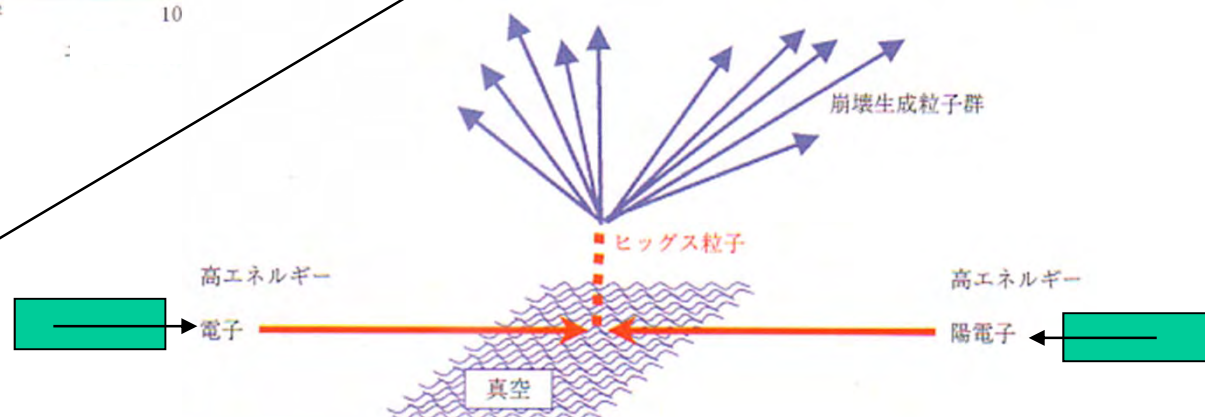
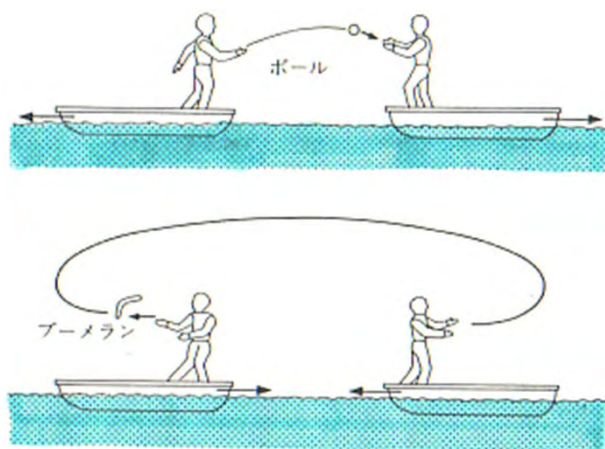
学部時代に勉強する



次世代の高エネルギー物理：Higgs粒子を探せ！

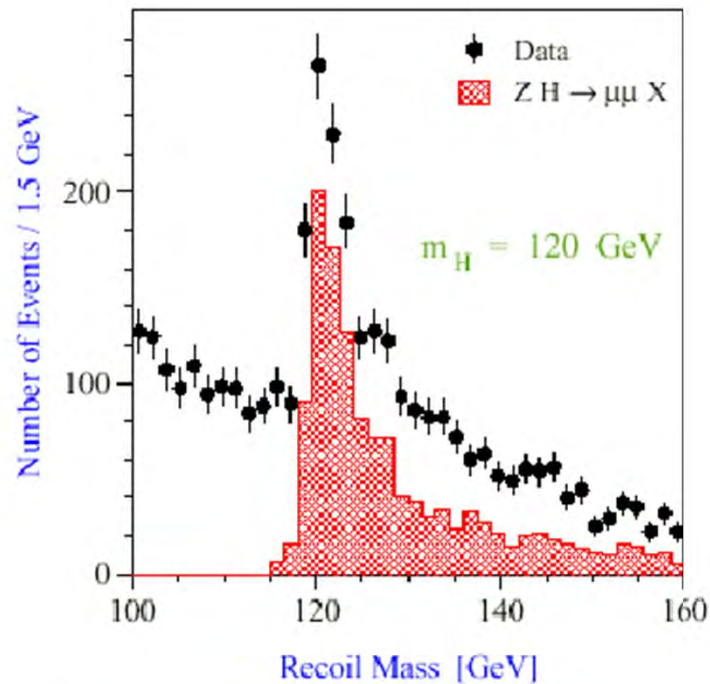


Higgs場



加速器：コライダー
エネルギーを真空の一点に集中して
Nano Cosmic Bigbanを人工的に作る道具

高エネルギー物理屋の夢



TDR detector; combined CCD+TPC (8)

$$\delta\left(\frac{1}{p}\right) \leq 7.10^{-5} (\text{GeV}/c)^{-1} \sim 1/10 \times \text{LEP}$$

$$\text{goal: } \delta M_{\mu\mu} < 0.1 \times \Gamma_Z$$

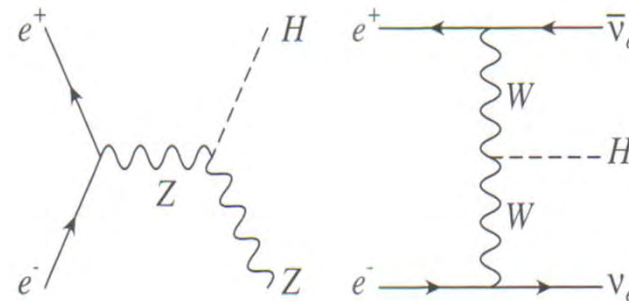
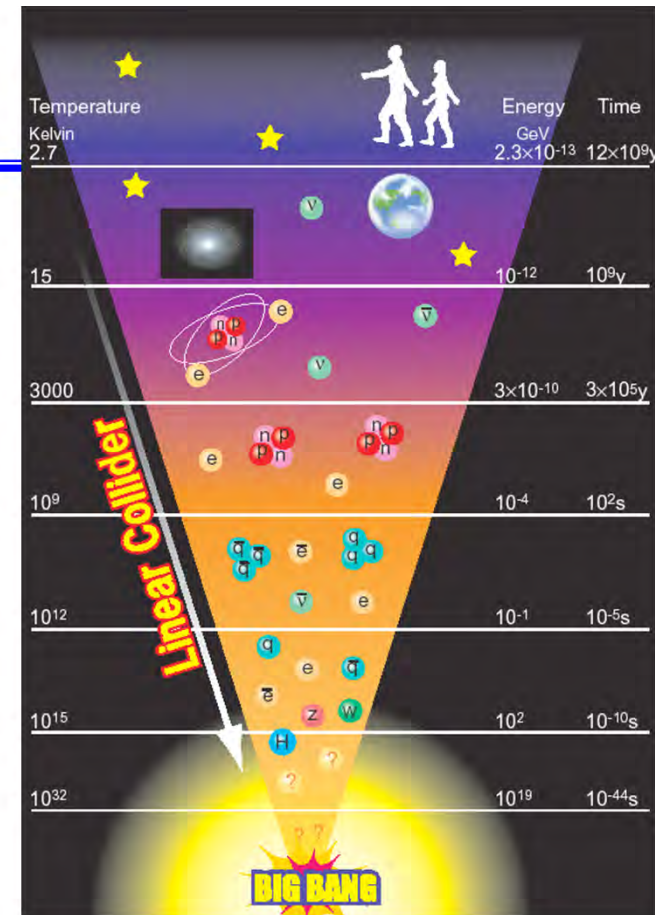


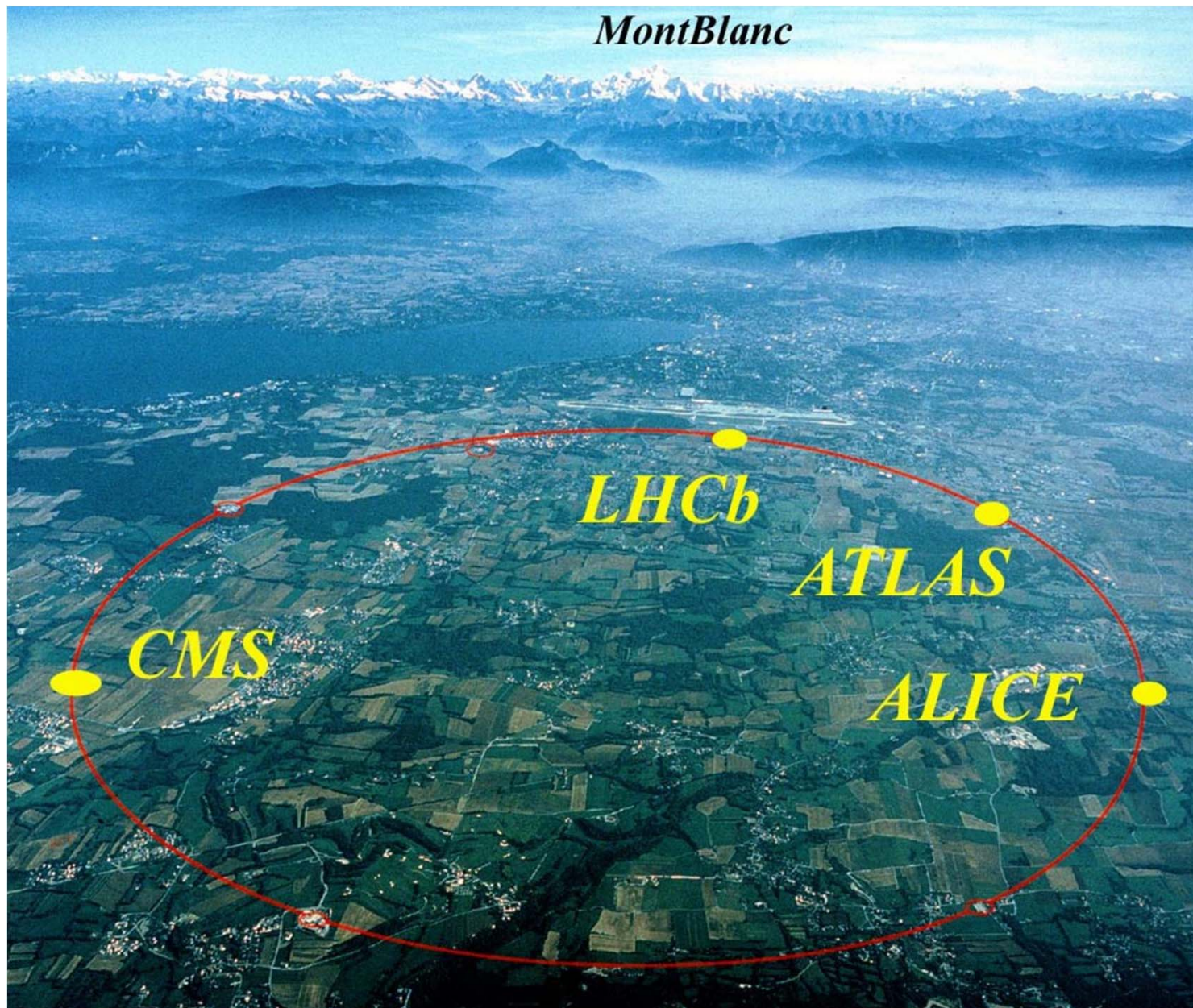
Figure 2.3: Higgs boson production processes for measurements of the Higgs-boson couplings to gauge bosons.

LHC

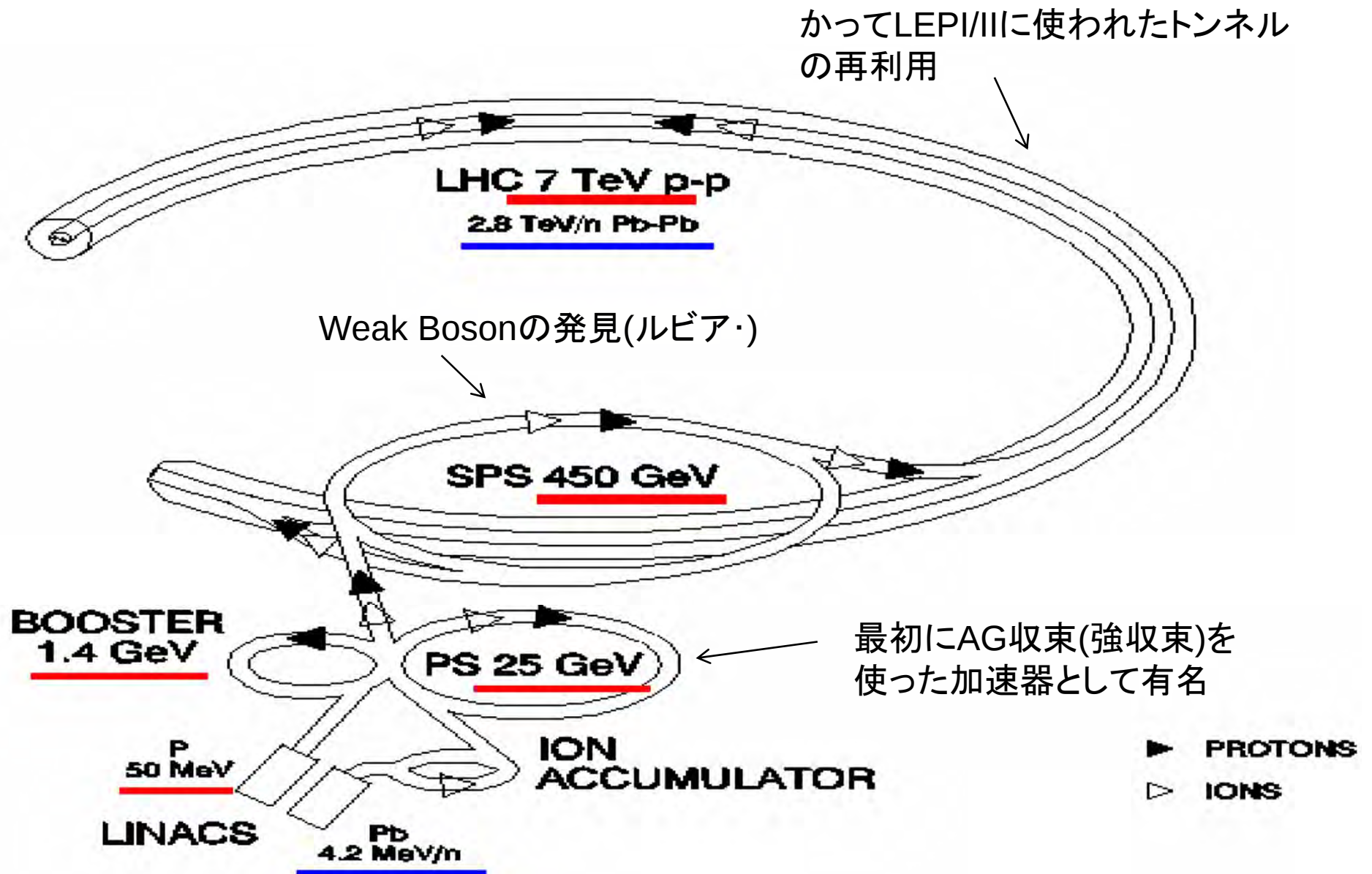
Higgs探索

— ALCPG11(March 19-23 2011)の報告から —

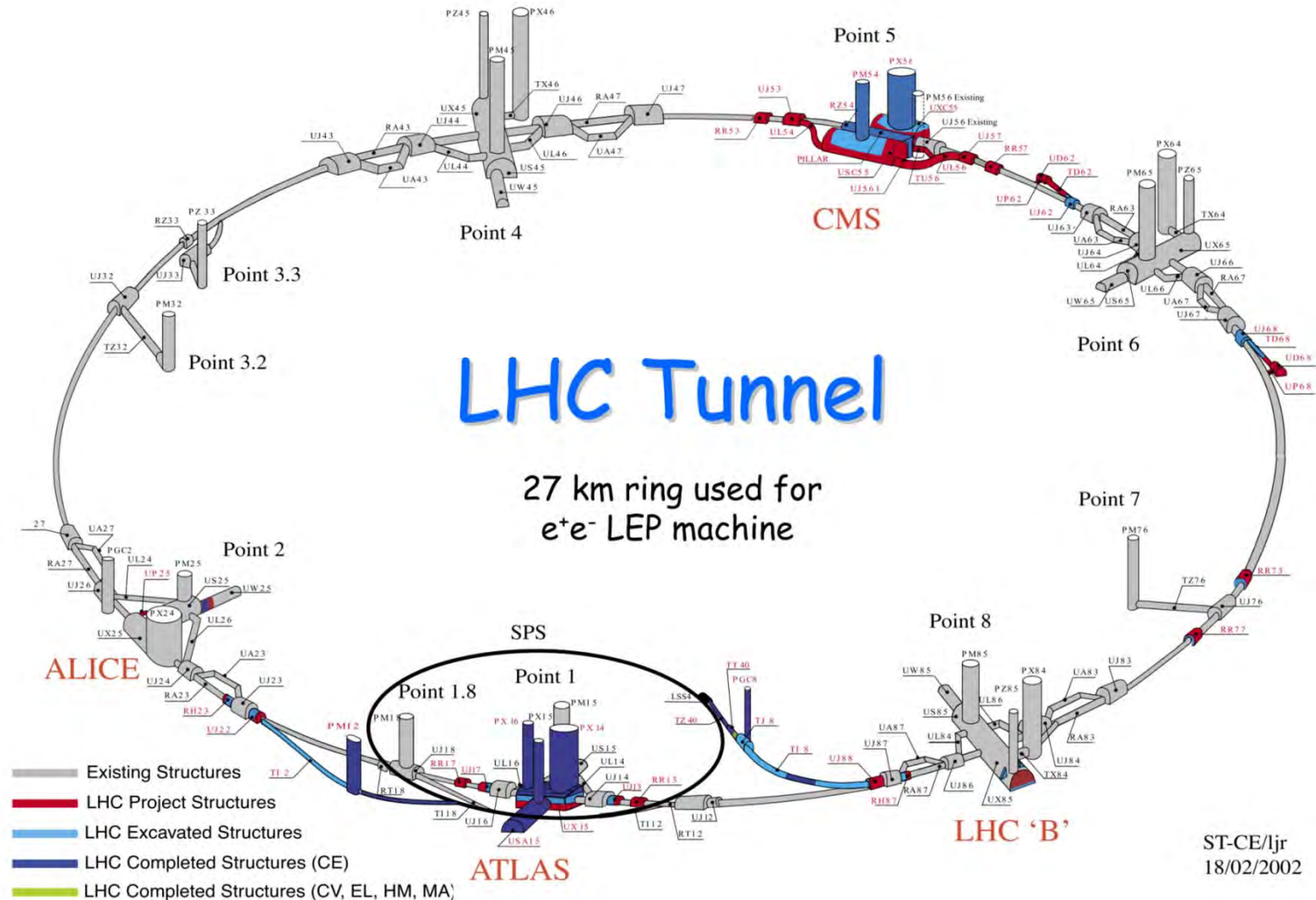
Ground View of the LHC



LHCとそのInjector構成群



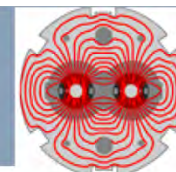
LHCの衝突点



現状では、ATLASとCMSが動いている。ATLASには日本の大学が参加している。



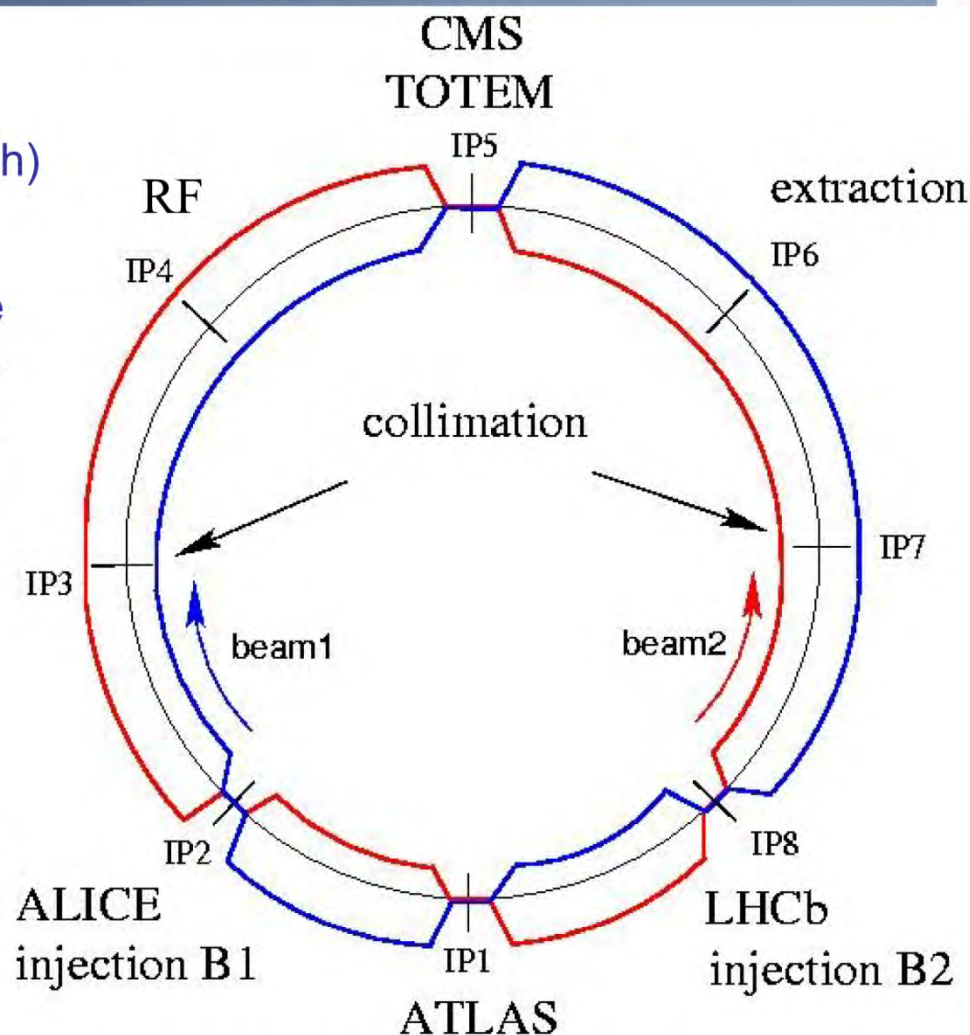
LHC layout and parameters



- 8 arcs (sectors), ~3 km each
- 8 long straight sections (700 m each)
- beams cross in 4 points
- 2-in-1 magnet design with separate vacuum chambers → p - p collisions

Nominal LHC parameters	
Beam energy (TeV)	7.0
No. of particles per bunch	1.15×10^{11}
No. of bunches per beam	2808
Stored beam energy (MJ)	362
Transverse emittance (μm)	3.75
Bunch length (cm)	7.6

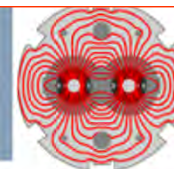
- $\beta^* = 0.55 \text{ m}$ (beam size = $17 \mu\text{m}$)
- Crossing angle = $285 \mu\text{rad}$
- $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



超伝導マグネットが根幹を占める加速器である。

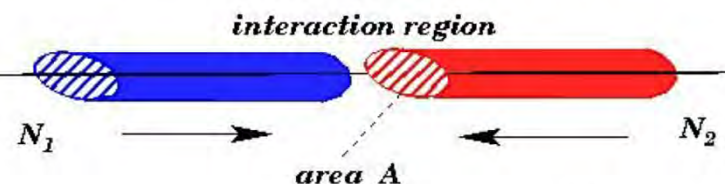


Luminosity : collider figure-of-merit



The event rate Υ for a physics process with cross-section σ is proportional to the collider Luminosity L :

$$\Upsilon = L\sigma$$



$$L = \frac{kN^2 f}{4\pi\sigma_x^* \sigma_y^*} = \frac{kN^2 f \gamma}{4\pi\beta^* \varepsilon}$$

k = number of bunches = 2808

N = no. protons per bunch = 1.15×10^{11}

f = revolution frequency = 11.25 kHz

σ_x^*, σ_y^* = beam sizes at collision point (hor./vert.) = $16 \mu\text{m}$

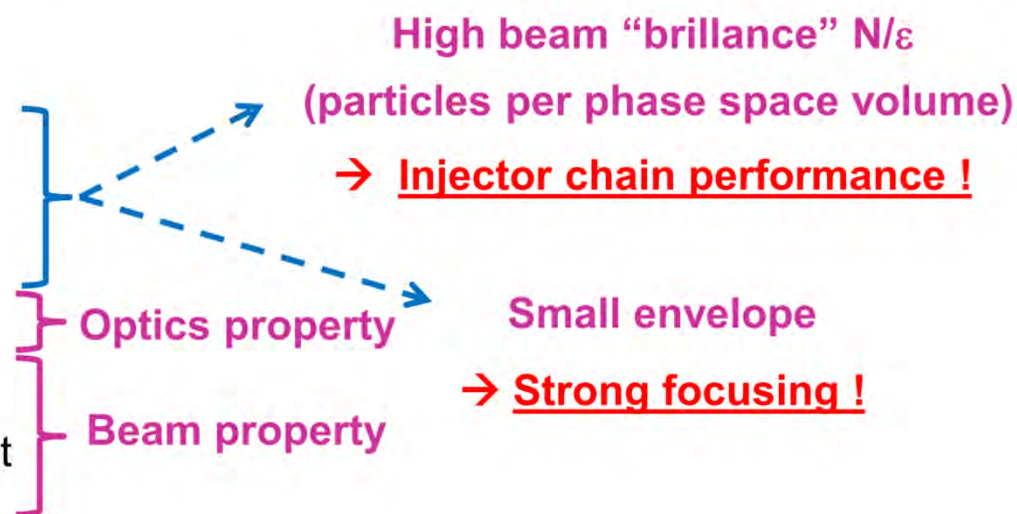
Design

To maximize L :

- Many bunches (k)
- Many protons per bunch (N)
- Small beam sizes $\sigma_{x,y}^* = (\beta^* \varepsilon)^{1/2}$

β^* : beam envelope (optics)

ε : beam emittance, the phase space volume occupied by the beam (constant along the ring)



betatron 振動, beam emittanceの詳細は後期授業で詳しく取り扱う。

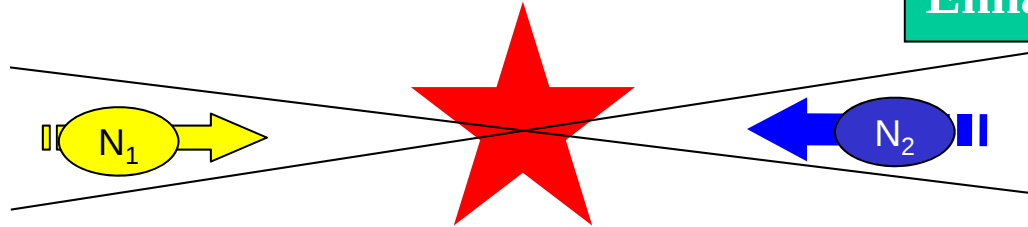
加速器でよく使われる専門用語

現象によって決まる

$$Y \sim N_1 \cdot N_2 / \text{beam 密度}$$

$$Y = L \cdot \sigma$$

Enhancement factor by pinch effect : ~ 2

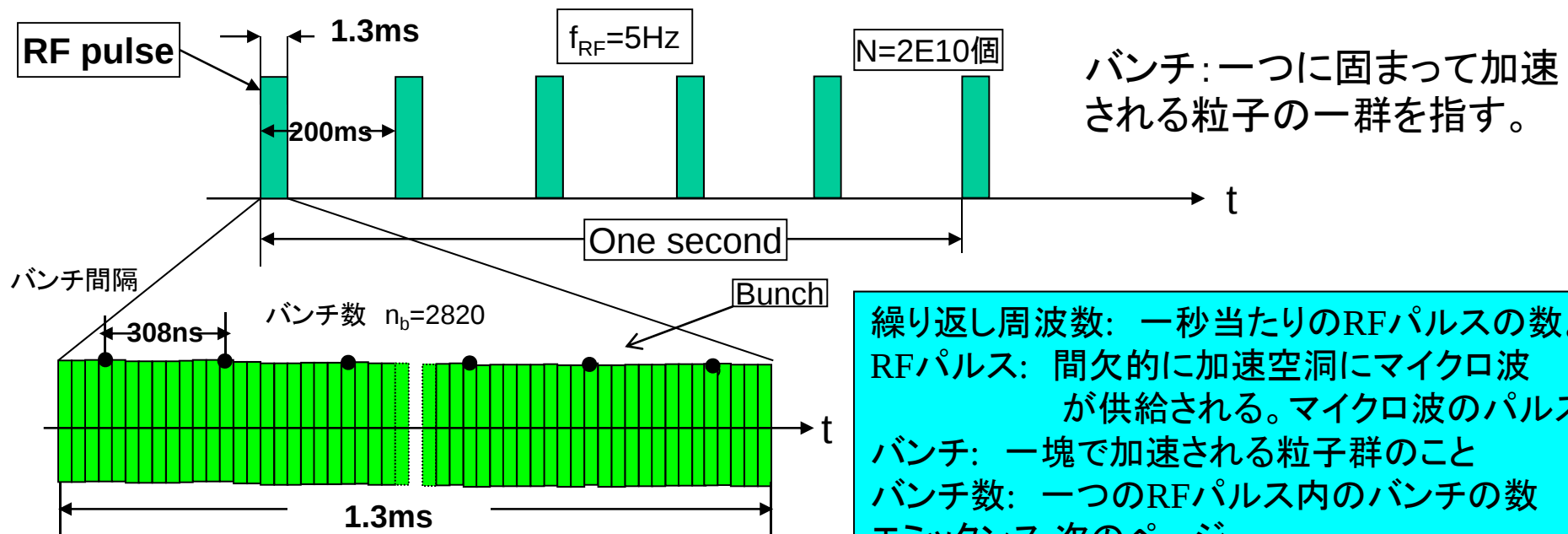


$$L = \frac{f_{rep} \cdot n_b \cdot N^2}{4\pi \sigma_x \cdot \sigma_y} \cdot H_D$$

Y: 単位時間当たりのイベント数
 σ : 単位時間当たりの反応断面積
 L: Luminosity

Lは加速器の性能を表す。
 Lが最大になるように設計する。

ビームの広がり

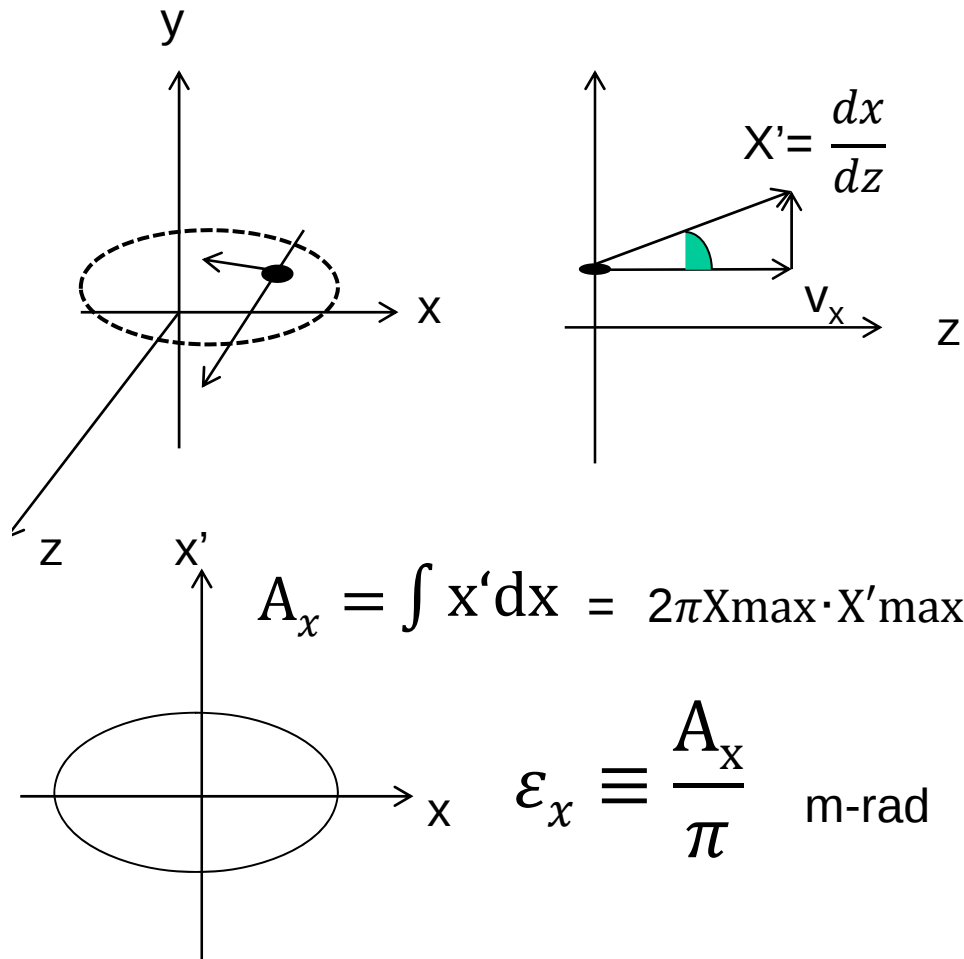


繰り返し周波数: 一秒当たりのRFパルス数。
 RFパルス: 間欠的に加速空洞にマイクロ波が供給される。マイクロ波のパルス。
 バンチ: 一塊で加速される粒子群のこと
 バンチ数: 一つのRFパルス内のバンチの数
 エミッタンス: 次のページ

ビームエミッタンスとベータートロン振動

加速ビームは、広がりをもつ。その目安としてエミッタンス(ϵ)が定義されている。

ビームがZ方向に走る時、Z軸に垂直断面をx-y平面とする。



加速ビームは軌道上の磁場(電磁石)のために蛇行しながら走る(ベータートロン振動)。

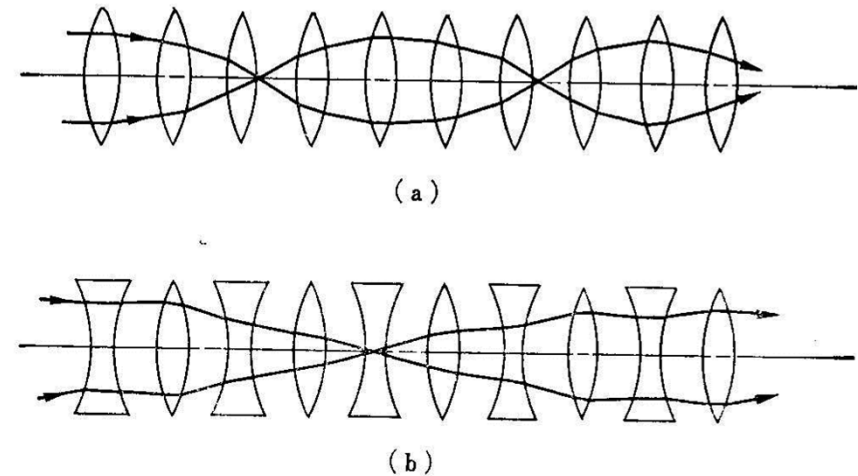


図 10.7 レンズ系でのたとえ

ベータートロン振動の波長を λ とすると
 $A_x = 2\pi^2 X_{\max}^2 / \lambda$ 、
 ベータートロン振動数が高いほどエミッタンスが良い。

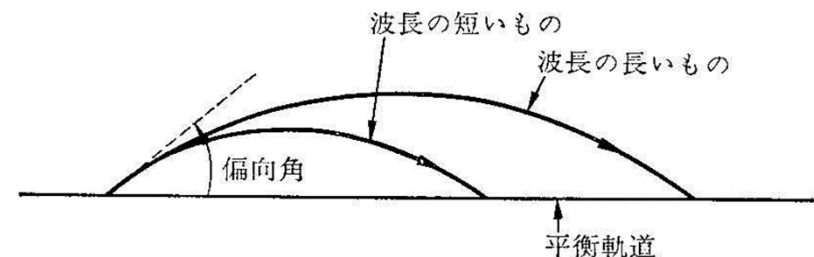
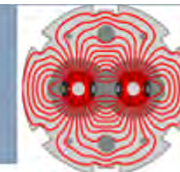
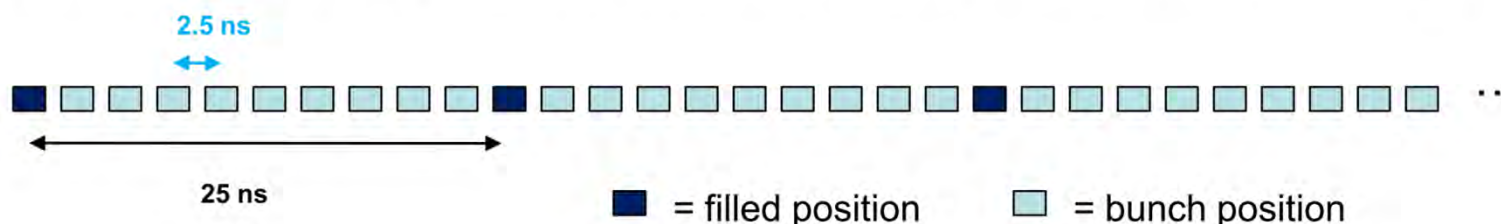


図 10.5 振幅と波長との関係



- The LHC 400 MHz Radio-Frequency system provides **35'640 possible bunch positions** every 2.5 ns (0.75 m) along the LHC circumference.
 - *A priori any of those positions could be filled with a bunch...*
- The smallest bunch-to-bunch distance is fixed to 25 ns: **max. number of bunches is 3564** (- some space for the dump kicker beam free region).



- Because of the injector flexibility, the LHC can operate with **isolated bunches** or with **trains of closely spaced bunches**.
 - *Operation in 2010 began with isolated bunches (separation $\geq 1 \mu\text{s}$), up to a maximum of 50 bunches.*
 - *From September 2010 the LHC was operated with trains of bunches separated by 150 ns (45 m), up to 368 bunches.*



ACCEL

LHC modules: Nb/Cu technology

- Design field is 2MV per cavity, installation planned for April 2006
- 16 MV required per beam => 2 modules per beam needed
- 4 modules or 16 cavities needed for operation of LHC
- 21 cavities ordered from industry => one spare module + one spare cavity



400MHz 単セル超伝導空洞

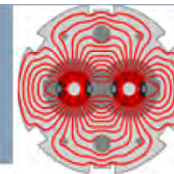
Four single cell cavities (400 MHz) in one vacuum vessel



Michael Pekeler, ACCEL
SRF in storage rings

12th International Workshop on RF Superconductivity
Ithaca, New York, USA, July 10-15, 2005

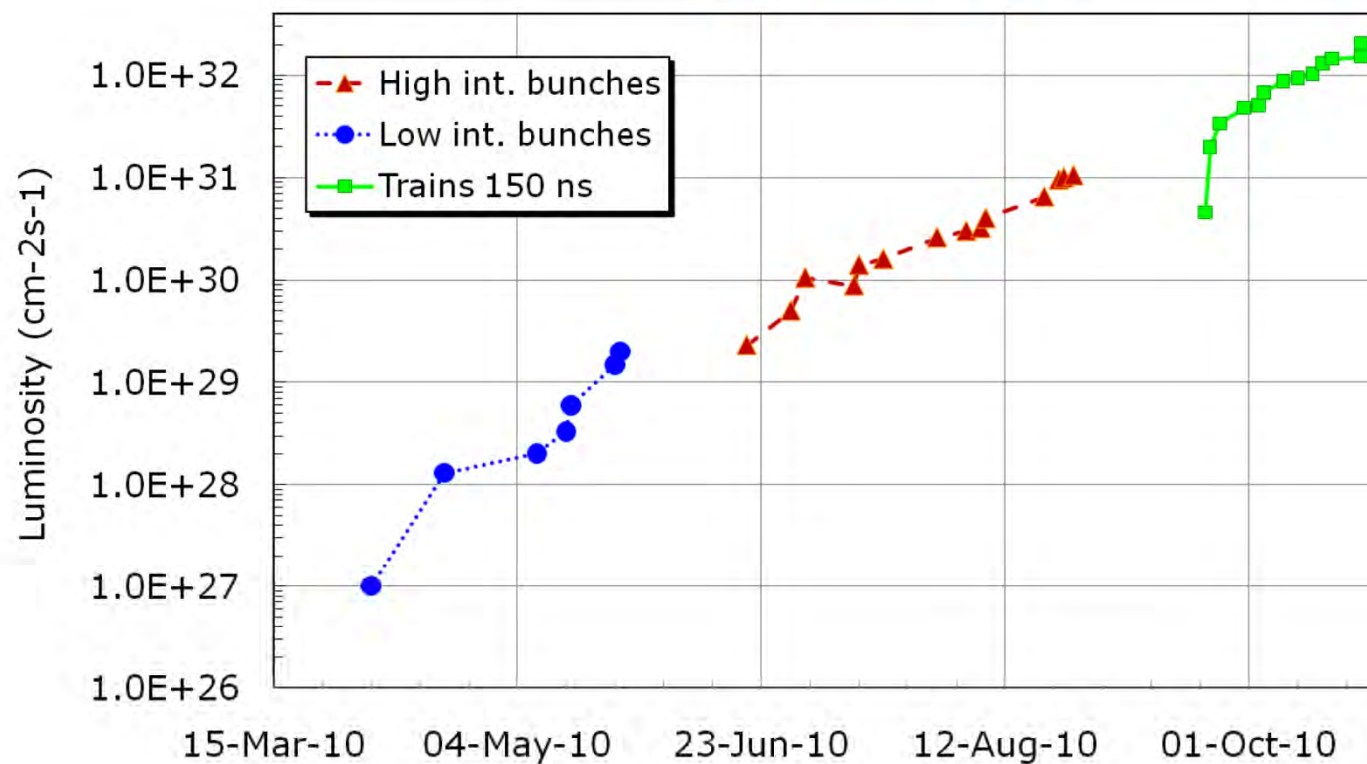
Peak luminosity performance

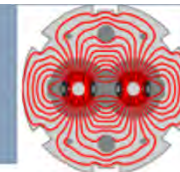


Peak luminosity = $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
(368 bunches/beam, 348 colliding bunches)

現在、目標Luminosityの1/5

LHC run 2010

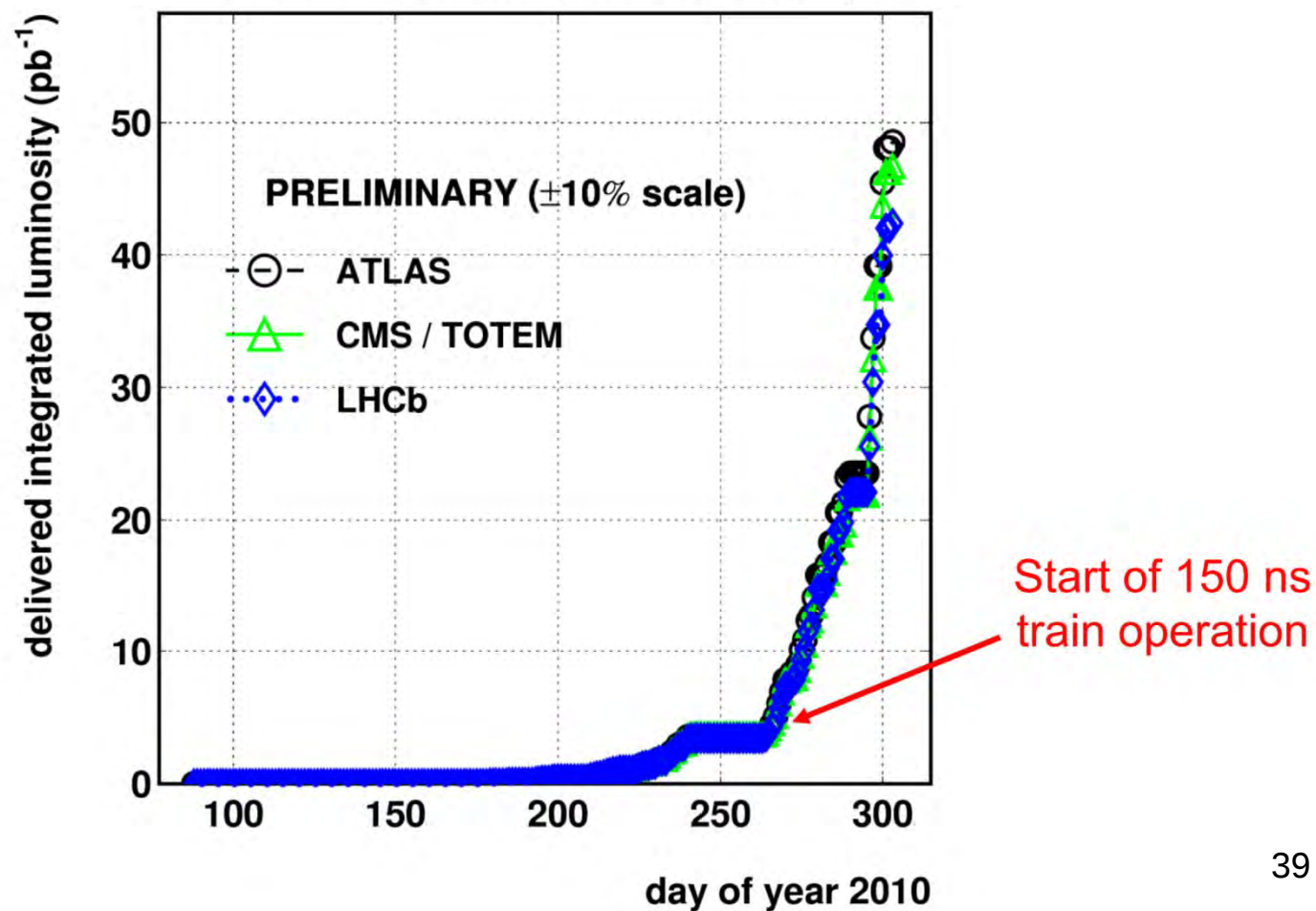




Integrated proton luminosity 2010 $\sim 48 \text{ pb}^{-1}$

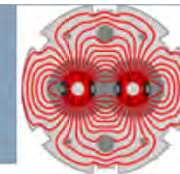
2010/11/05 08.33

LHC 2010 RUN (3.5 TeV/beam)

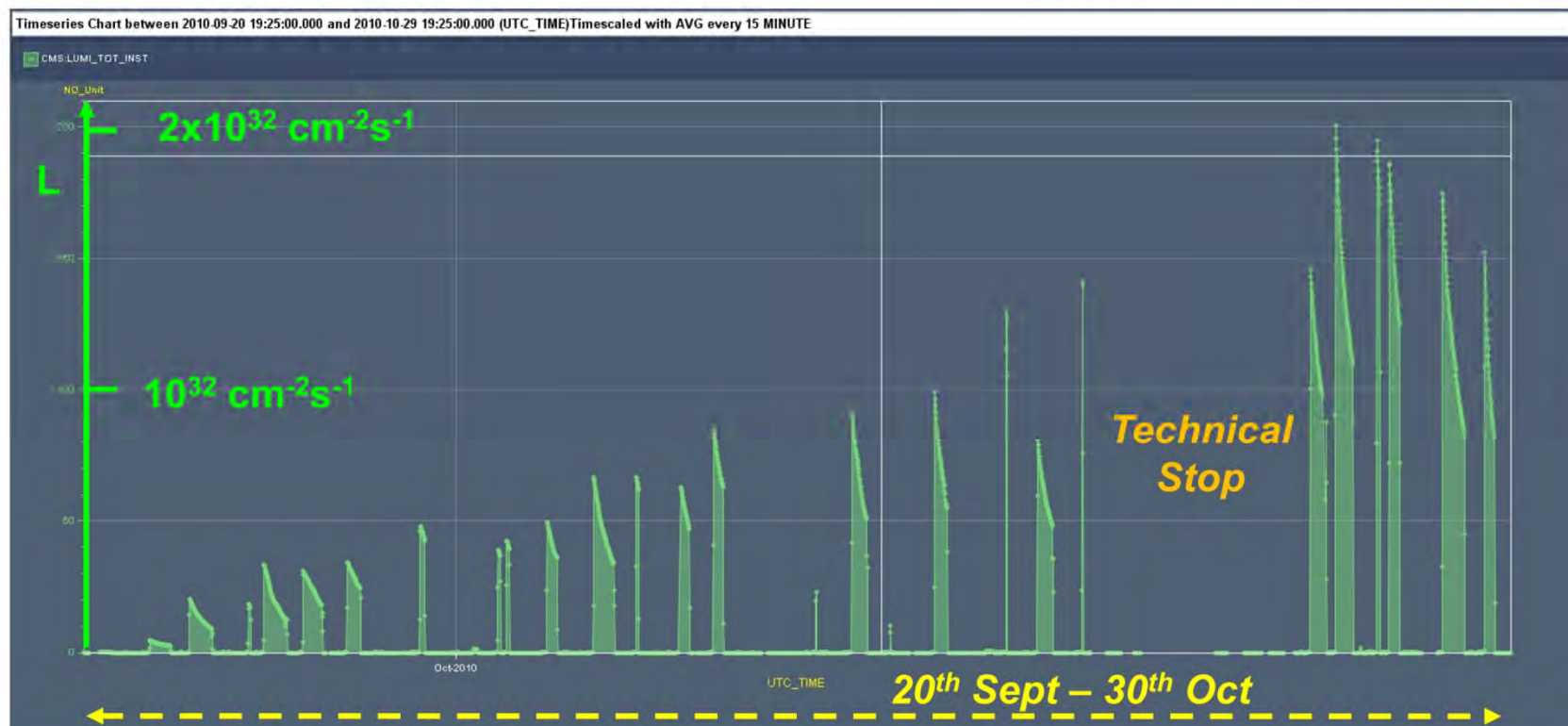




Operation with 150 ns

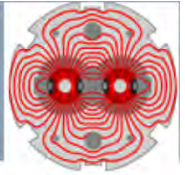


- ❑ Operation with 150 ns was rather smooth - ***some warning signs cfor even higher intensities*** – see next slides.
- ❑ Bunch intensities were pushed slightly above design, emittances were 40% smaller than design.
- ❑ No problems with beam-beam effects, beam lifetimes typically 25 hours in collisions, luminosity lifetimes ~12-15 hours (due to emittance growth).

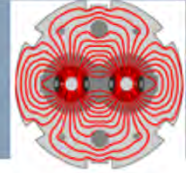




Unidentified Flying Objects - UFOs



- ❑ As the beam intensity was increased ***unexpected fast beam loss events*** were observed in the super-conducting regions of the ring:
 - *Fast loss over ~0.5-2 ms, leading to a dump of the beam.*
 - *Most events occurred during 'rock' stable periods.*
 - *Losses in regions of very large aperture.*
- ❑ The hypothesis quickly emerged that it is not the beam that moves to the aperture, but rather the opposite !
 - *'Dust' particles 'falling' into the beam, estimated size ~100 μm thick Carbon-equivalent object.*
- ❑ We do not understand the mechanism that triggers such events.
 - *It is clearly induced by (presence of) beam – electromagnetic fields at the surface of the vacuum chamber. Sparking ???*

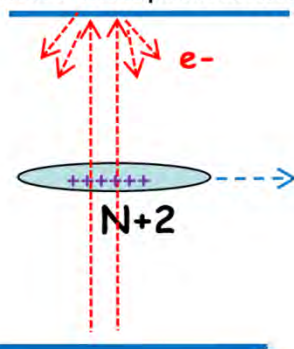


... affect high intensity beams with positive charge and closely spaced bunches.

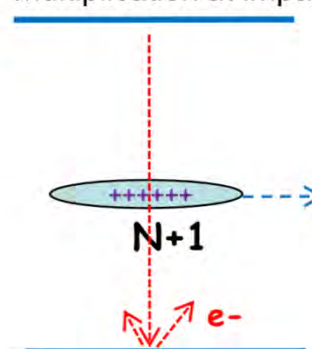
- Electrons are generated at the vacuum chamber surface by beam impact, photons...
- If the **probability to emit secondary e- is high (enough)**, more e- are produced and accelerated by the field of a following bunch(es). Multiplication starts...
 - *Electron energies are in the 10- few 100 eV range.*
- The cloud of e- can drive pressure rise, beam instabilities and possibly overload the cryogenic system by the heat deposited on the chamber walls !

→ The cloud can 'cure itself': the impact of the electrons cleans the surface (Carbon migration), reduces the electron emission probability and eventually the cloud disappears – '**beam scrubbing**'

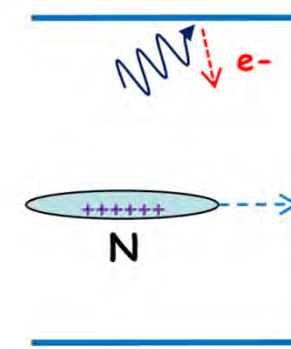
Bunch N+2 accelerates the e-, more multiplication...



Bunch N+1 accelerates the e-, multiplication at impact



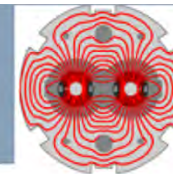
Bunch N liberates an e-



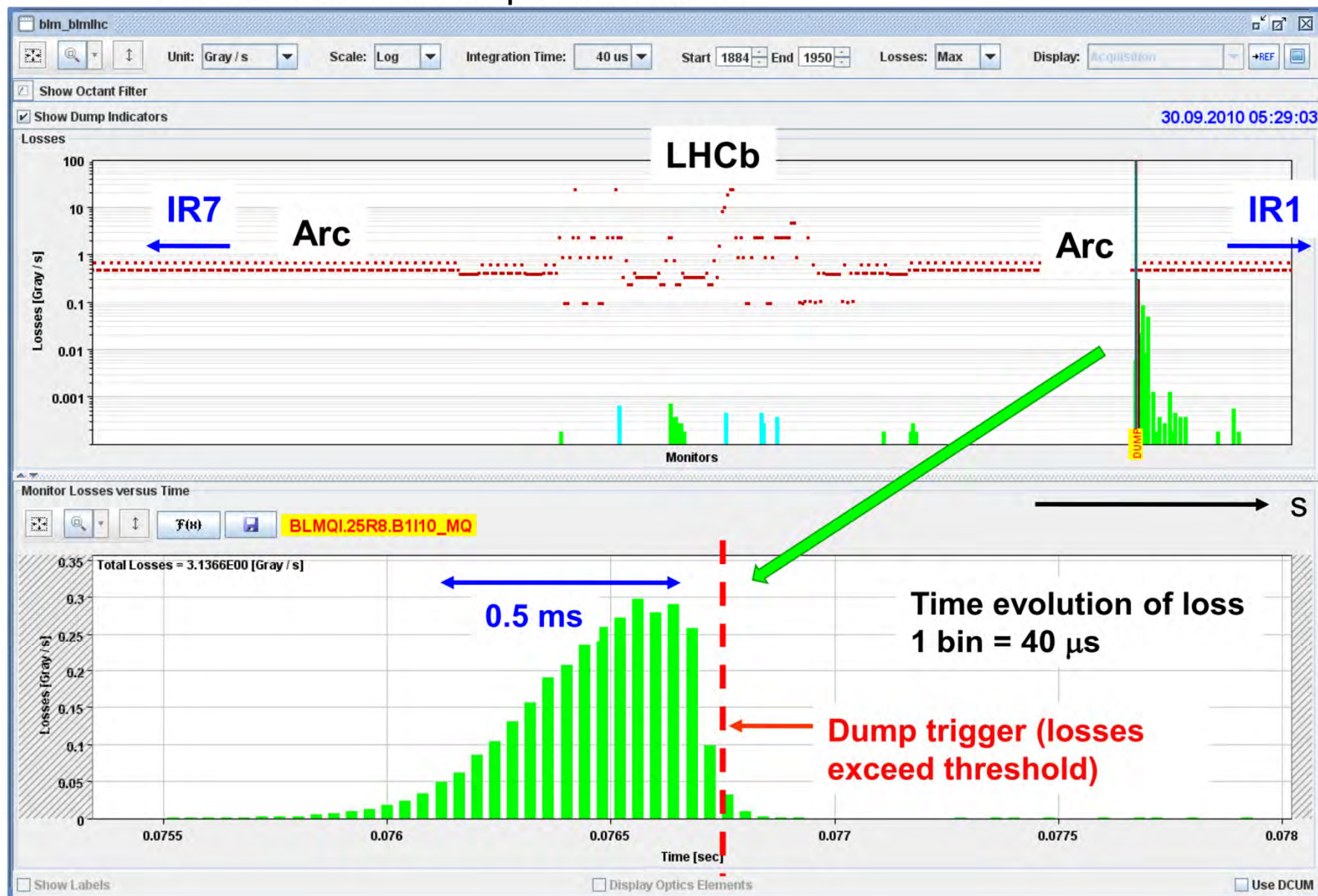
超伝導加速空洞と共通の課題： 二次電子放出係数の小さい金属表面をどう実現するか



Example of a UFO (152 bunches)

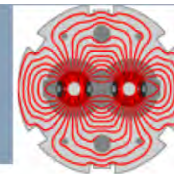


Beam loss monitor post-mortem





Predicted machine performance in 2011



	Nominal	Probable 2011
Energy (GeV)	7000	3500
Bunches per beam	2800	900
Bunches intensity (10^{11})	1.1	1.2
Normalised emittance (10^{-6}m)	3.75	2.4
β^* (m)	0.55	1.5

Peak Luminosity $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

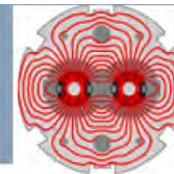
Assume 160 days operation with 40 % efficiency and average luminosity

$7 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Integrated luminosity in 2011 4 fb^{-1}



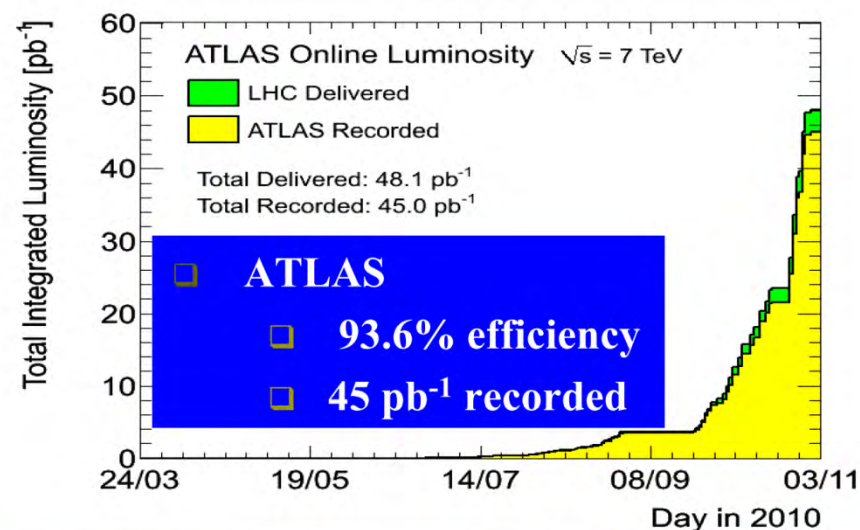
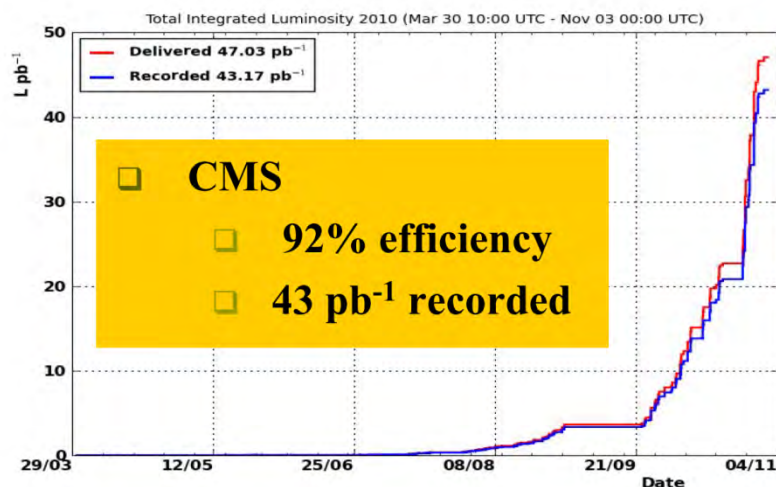
Conclusions



- ❑ Luminosity target of $10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ for 2010 has been reached.
- ❑ The 2011 run will start mid March.
 - *In 2011 peak luminosities up to $10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ can be expected.*
 - *Peak luminosity and bunch configuration will depend on e-cloud effects.*
 - *3-4 fb⁻¹ is within reach.*
- ❑ The Pb ion proceeded smoothly.
 - *Transition was fast.*
 - *A similar run will take place end of 2011.*
- ❑ The LHC will run in 2012
 - *A reasonable target is 10 fb⁻¹ by the end of 2012*



Luminosity for the pp collisions data



2010 has been the most exciting & successful year in the history of LHC so far.

Prolay Kumar Mal

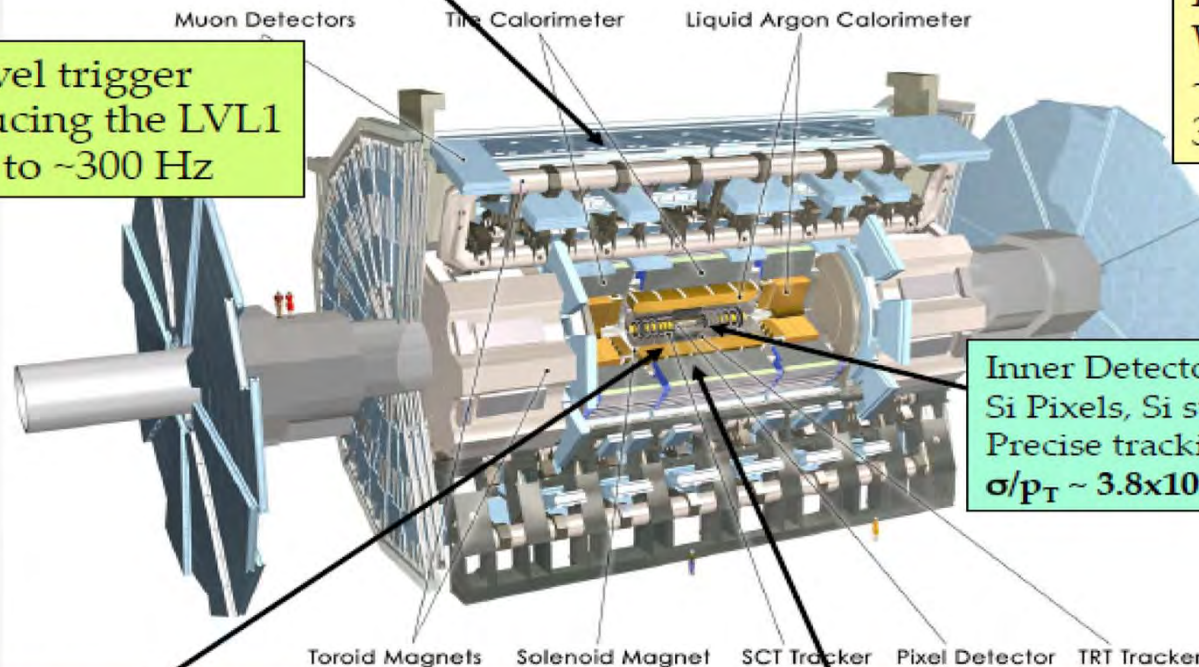
ALCPG11, Eugene, Oregon, March 19-23, 2011

A Toroidal LHC Apparatus

Muon Spectrometer ($|\eta| < 2.7$) : air-core toroids with gas-based muon chambers
 Muon trigger and measurement with momentum resolution $< 10\%$ up to $E_\mu \sim 1 \text{ TeV}$

Length : $\sim 46 \text{ m}$
 Radius : $\sim 12 \text{ m}$
 Weight : $\sim 7000 \text{ tons}$
 $\sim 10^8$ electronic channels
 3000 km of cables

3-level trigger
 reducing the LVL1
 rate to $\sim 300 \text{ Hz}$

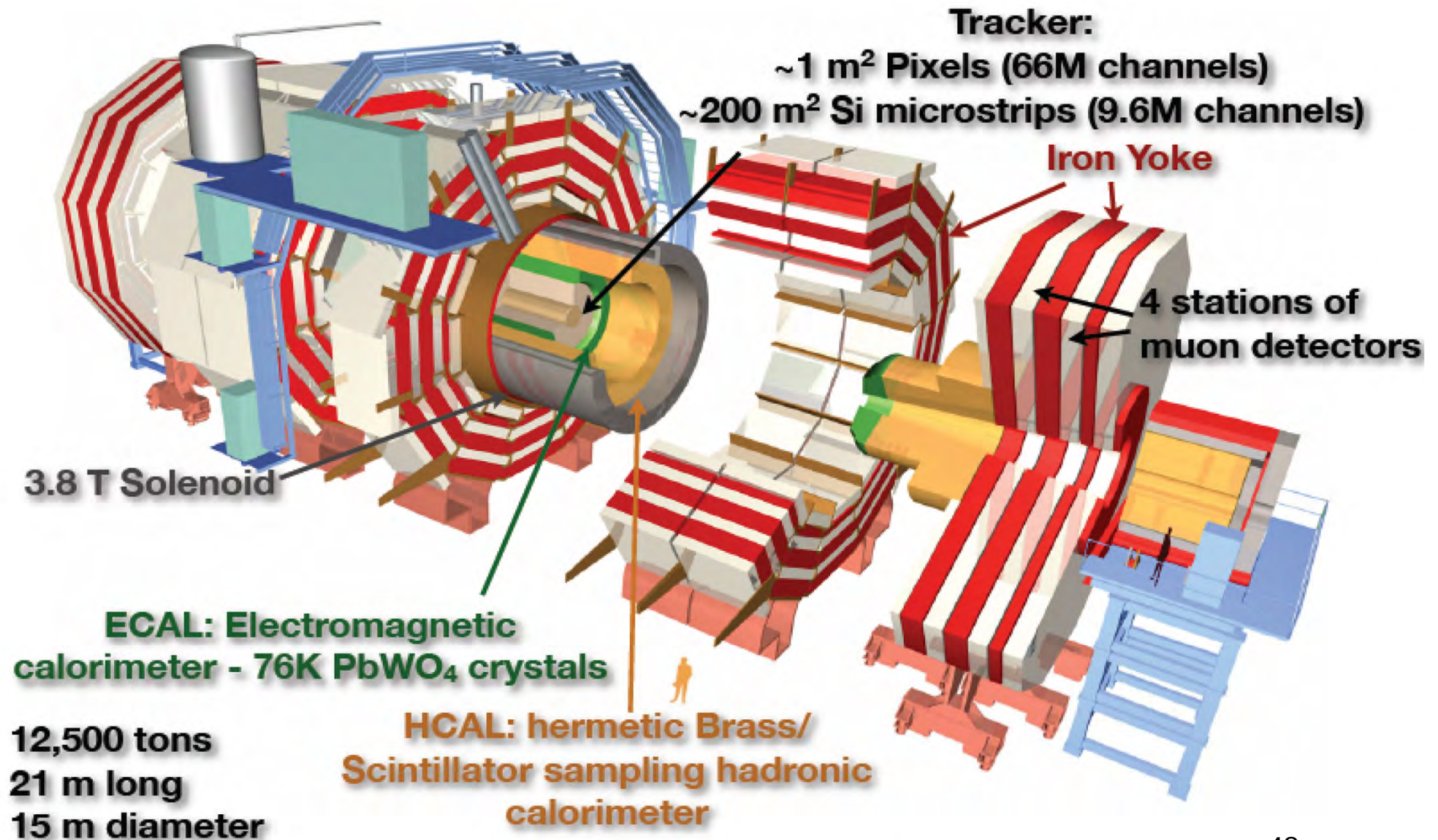


Inner Detector ($|\eta| < 2.5$, $B=2\text{T}$):
 Si Pixels, Si strips, TRT
 Precise tracking and vertexing,
 $\sigma/p_T \sim 3.8 \times 10^{-4} p_T (\text{GeV}) \oplus 0.015$

EM calorimeter: Pb-LAr Accordion
 e/γ trigger, identification and measurement
 E-resolution: $\sigma/E \sim 10\%/\sqrt{E} \oplus 0.007$
 High granularity

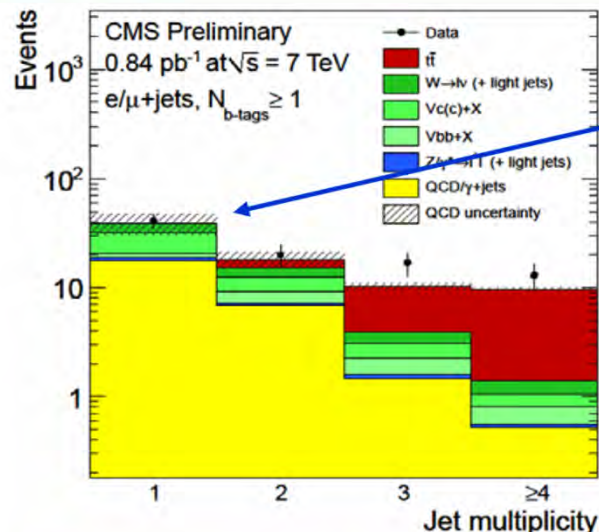
Hadron calorimetry ($|\eta| < 4.9$)
 Fe/scintillator Tiles (central), Cu-LAr (endcap)
 E-resolution: $\sigma/E \sim 50\%/\sqrt{E} \oplus 0.03$
 FWD calorimetry: Cu/W-LAr $\sigma/E \sim 90\%/\sqrt{E} \oplus 0.07$

Compact Muon Solenoid

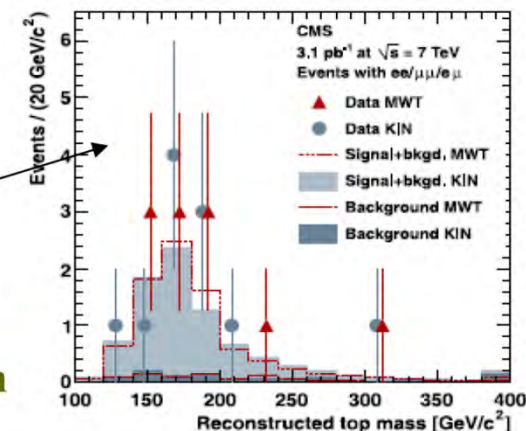




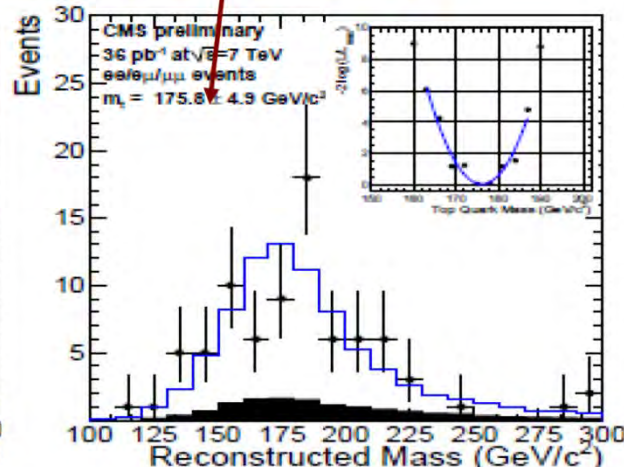
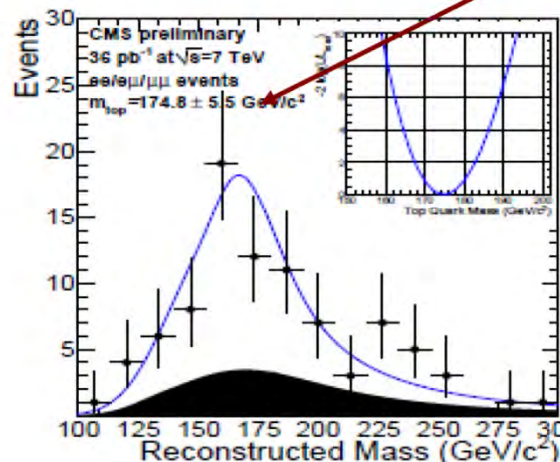
Top Quark



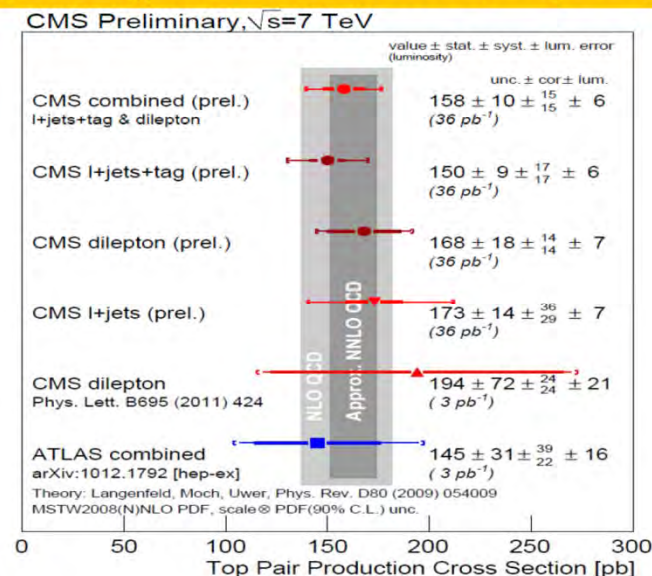
- Studies of $t\bar{t} \rightarrow e^\pm/\mu^\pm + \text{jets}$ events with 78 nb⁻¹ data.
- Production Cross-section measurement ($\sigma_{t\bar{t}}$) in $t\bar{t} \rightarrow l^+l^-$ channel (3.1 pb⁻¹)
- Updated results on $\sigma_{t\bar{t}}$ with 35 pb⁻¹
- Top mass measurements in dilepton channel (36 pb⁻¹)



$$m_{\text{top}} = 175.5 \pm 4.6(\text{stat}) \pm 4.6(\text{syst}) \text{ GeV}/c^2$$

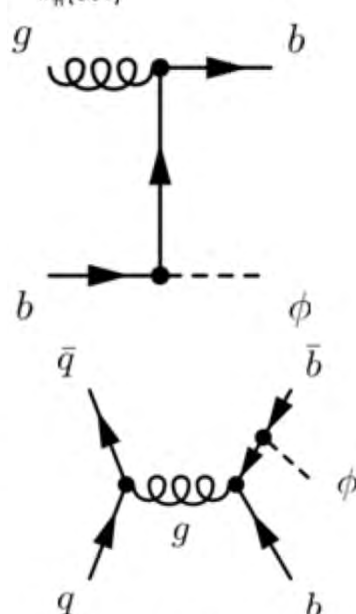
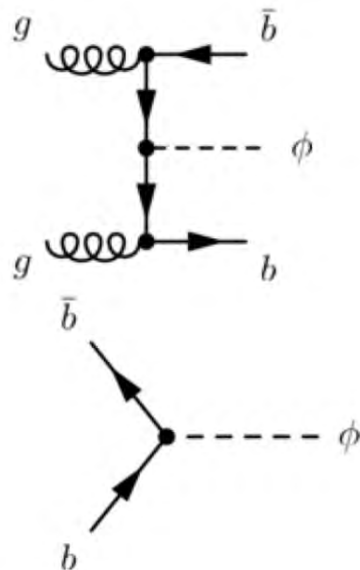
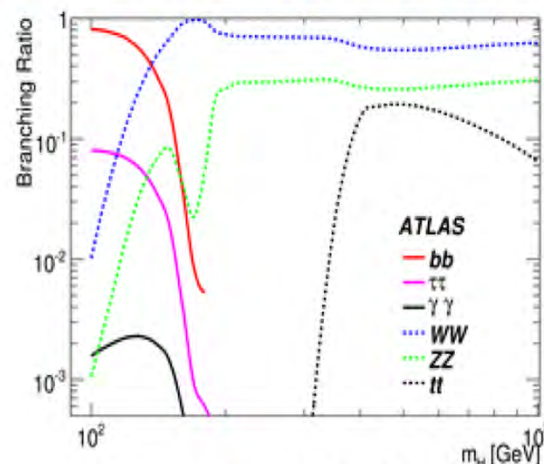
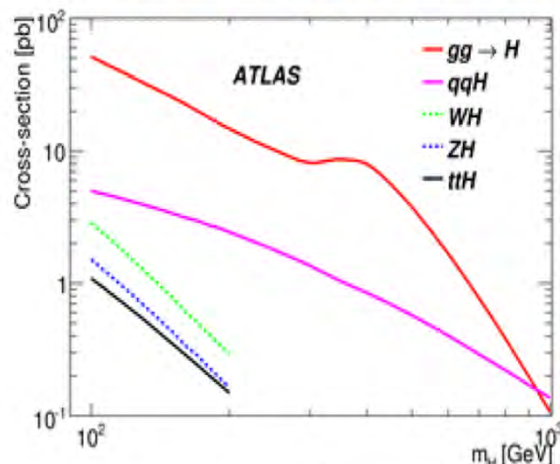


Summary of $\sigma_{t\bar{t}}$ measurements (36 pb⁻¹)



Higgs Searches

SM Higgs Production & Decay modes



Standard Model Higgs Searches

- High mass searches are dominated by $H^0 \rightarrow W^+W^-$ and $H^0 \rightarrow Z^0Z^0$ searches
- Low mass searches in $H^0 \rightarrow \gamma\gamma$

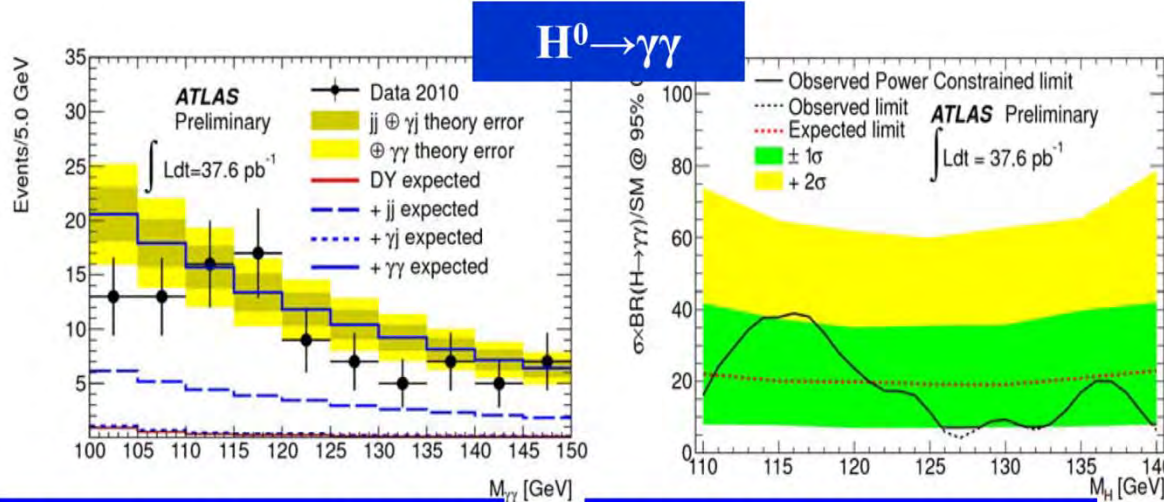
MSSM Higgs searches – 5 physical Higgs bosons (h, A, H and $H^\pm$)

Neutral Higgs bosons ($h/A/H \equiv \Phi$)

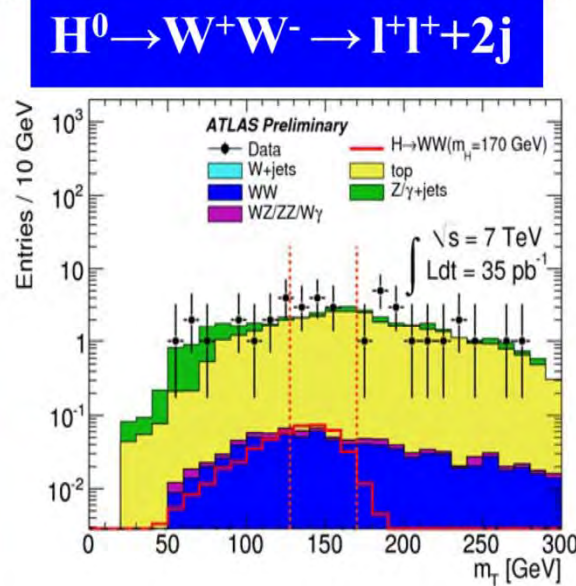
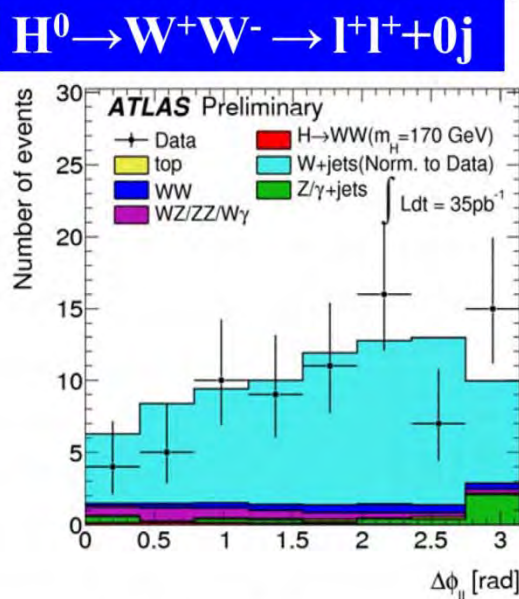
- At large $\tan\beta$, enhancement of the Higgs coupling with the “down”-type quarks (e.g., b-quarks) over the SM; and hence the overall production cross section enhancement.
- $BR(\Phi \rightarrow \tau\tau) \approx 10\%$ for large $\tan\beta$
- $\Phi \rightarrow \tau_{had} \tau_{lep}$ searches have great potential



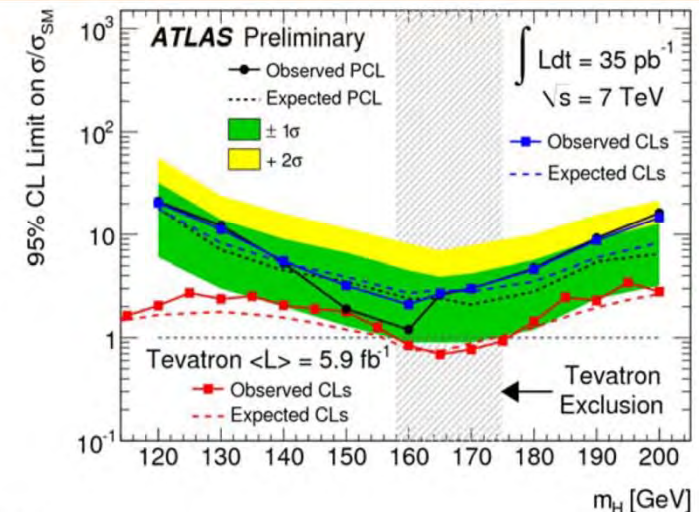
SM Higgs Searches



- Standard Model Higgs Searches
- Low mass searches in $H^0 \rightarrow \gamma\gamma$ (ATLAS 37 pb^{-1}).
- High mass searches are dominated by $H^0 \rightarrow W^+W^-$ and $H^0 \rightarrow Z^0Z^0$ searches
- $H^0 \rightarrow W^+W^- \rightarrow l^+l^-$ only (ATLAS 35 pb^{-1})



Exclusion limit of 1.2 @ 95% CL for $m_H = 160 \text{ GeV}/c^2$





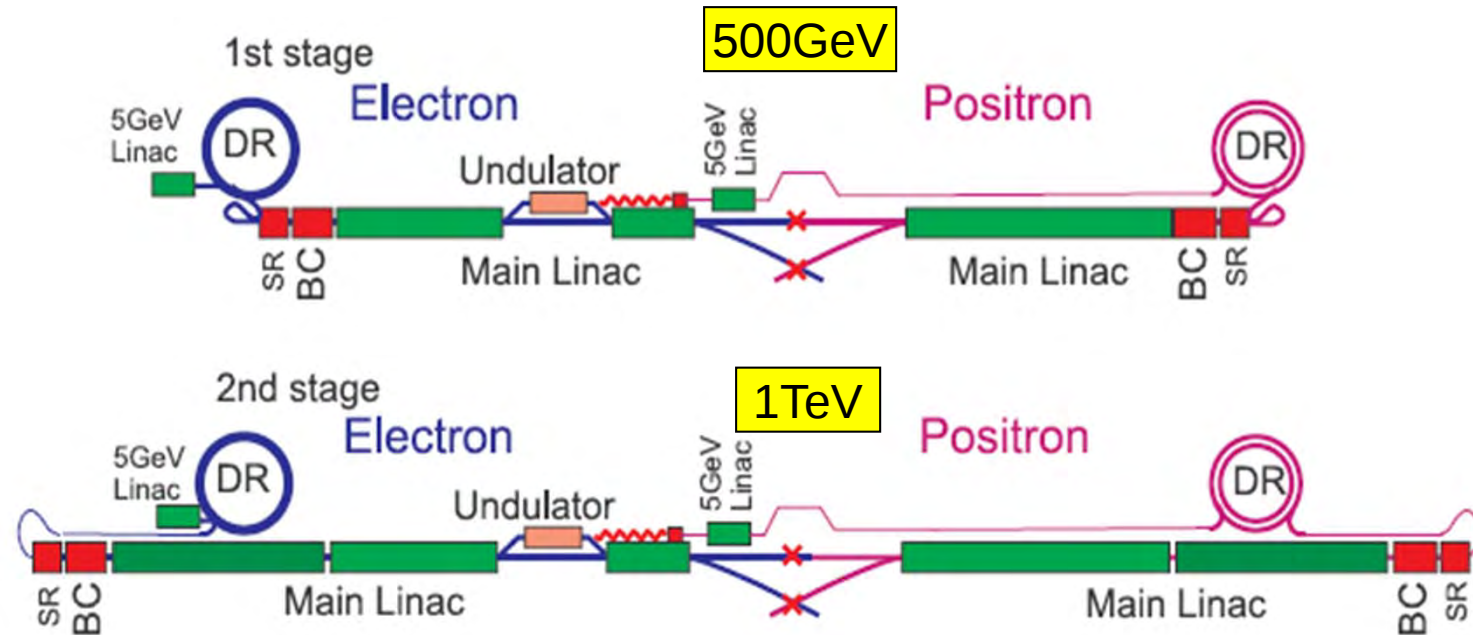
Summary & Outlook

- **ATLAS and CMS experiments have been quite efficiently operational during 2010 LHC running. Detector calibration and performances have been tested and improved through the usage of collisions data.**
- **Both experiments have performed comprehensive set of SM measurements using the pp collisions data at $\sqrt{s}=7$ TeV.**
 - **Measurements are compatible with SM predictions and within the experiments.**
- **A significantly large number of physics analyses have been devoted to look for the new physics beyond the Standard Model (BSM), including Higgs bosons (both SM and BSM) and SUSY searches.**
 - **No evidence for new physics or Higgs bosons found in 2010 data. Exclusion limits have been set in various areas, already exceeding the current Tevatron limits.**
- **Further details about ATLAS/CMS physics analysis:**
 - **ATLAS:** <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic>
 - **CMS:** <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/PhysicsResults>
- **Prospects for the Higgs, SUSY and BSM searches seem to be quite promising with 2011-12 LHC running. 2011 LHC running would accumulate at least 50 times larger dataset.**

LHC has resumed its first pp collisions in 2011. Stay Tuned!

ILCと超伝導空洞

ILC Machine Scheme



Electron Source : 電子発生源 Positron Source : 陽電子発生源

Undulator : 電子を交番磁場の中で蛇行運動させ、ガンマー線を発生させる装置。そのガンマー線を薄い金属ターゲットに当て、陽電子を生成する。

Spin Rotator (SR) : 電子・陽電子の偏極の向きを回転する装置。

Damping Ring (DR) : 電子・陽電子をリングにしばらく貯めて、細い(低エミッタンス)ビームを生成する。

Bunch Compressor (BC) : 減衰リングでのバンチ(加速電子・陽電子群)の長は、衝突用には長すぎるのでこれを短く圧縮する。

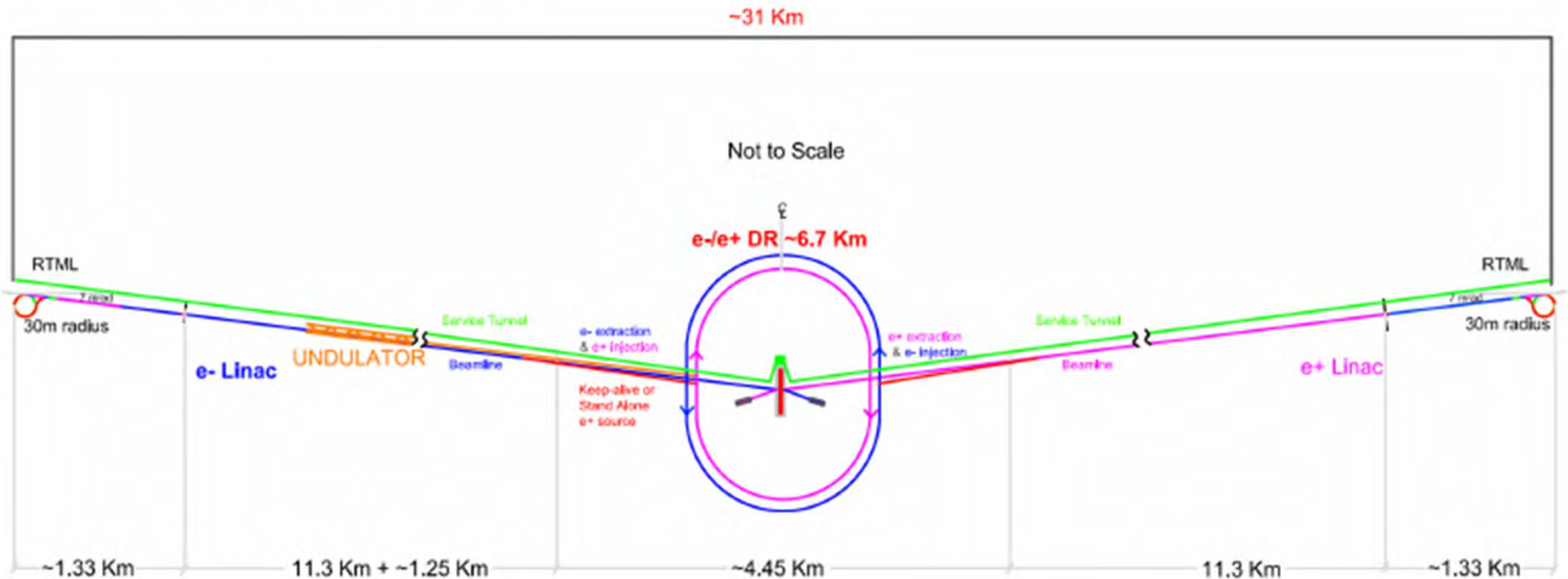
Main LINAC: 電子・陽電子を250GeVまで加速して運動エネルギーを与える。リニアコライダーでもっとも大きな部分である。

Beam Delivery System(BDS) : Main LINACで加速した電子・陽電子ビームを絞りながら衝突点に導く。

Interaction Point (IP) : 電子・陽電子を衝突させる。その回りは粒子検出装置で被われる。

最近の設計 (RDR)

1st Stage: 500 GeV



Schematic Layout of the 500 GeV Machine

Design of the ILC

現象によって決まる

$$Y = L \cdot \sigma$$

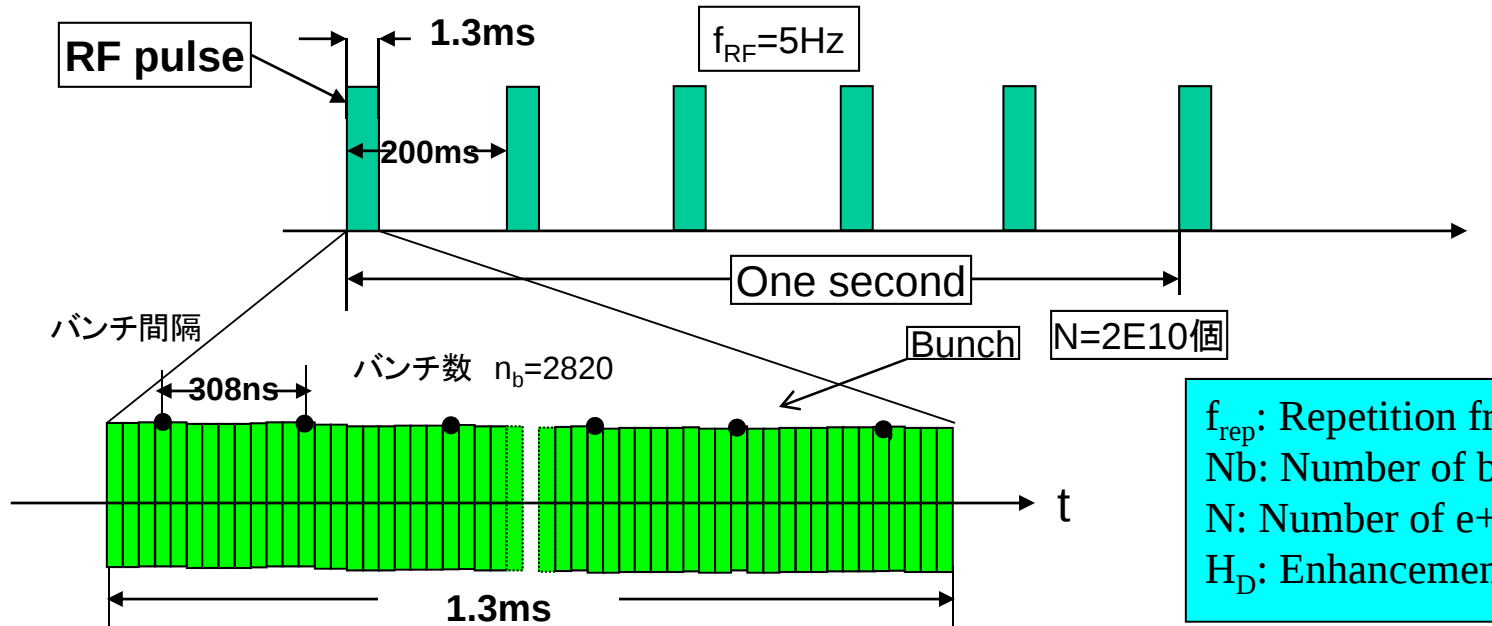
Enhancement factor by pinch effect : ~ 2

$$L = \frac{f_{rep} \cdot n_b \cdot N^2}{4\pi\sigma_x \cdot \sigma_y} \cdot H_D$$

Y: 単位時間当りのイベント数
 σ : 反応断面積
 L: Luminosity

Lは加速器の性能を表す。
 Lが大になるように設計する。

ビームの広がり



f_{rep} : Repetition frequency
 N_b : Number of bunches per rf pulse
 N : Number of e^+/e^- per bunch
 H_D : Enhancement factor by pinch effect

Requirement from SCRF

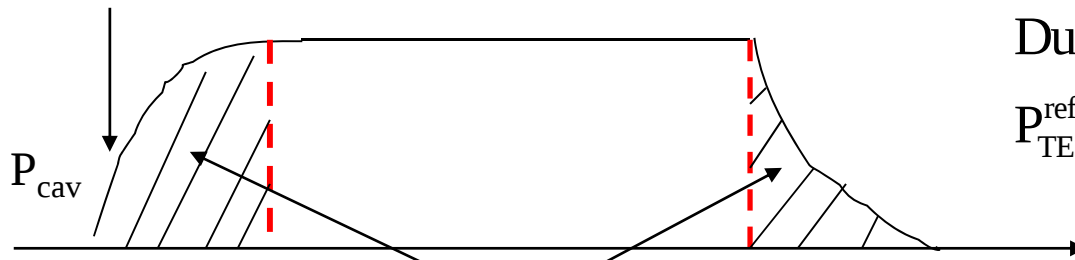
繰り返しを少なく、Beam pulse長を長く。

CWが理想的。物理実験ではトリガー必要。
CWでは冷凍機の負荷大きすぎる。

Pulse運転



Filling time(420 μ s)



$$P_{loss} = \left(\frac{E_{acc}}{Z} \right)^2 / Q_o$$

$$\approx 60W / cavity @23.4MV/m$$

$$P_{Total} = 60 \times 21000 = 1.26 \cdot 10^5 = 1260KW$$

$$\eta \sim 1/1000, \text{ Pref.} \approx 1260MW$$

$$\text{Duty} = 1.3msec \times 5/1 \text{ sec} = 6.5 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{TESLA}^{ref.} = 6.5 \cdot 10^{-3} \times 1260MW = 81.9MW$$

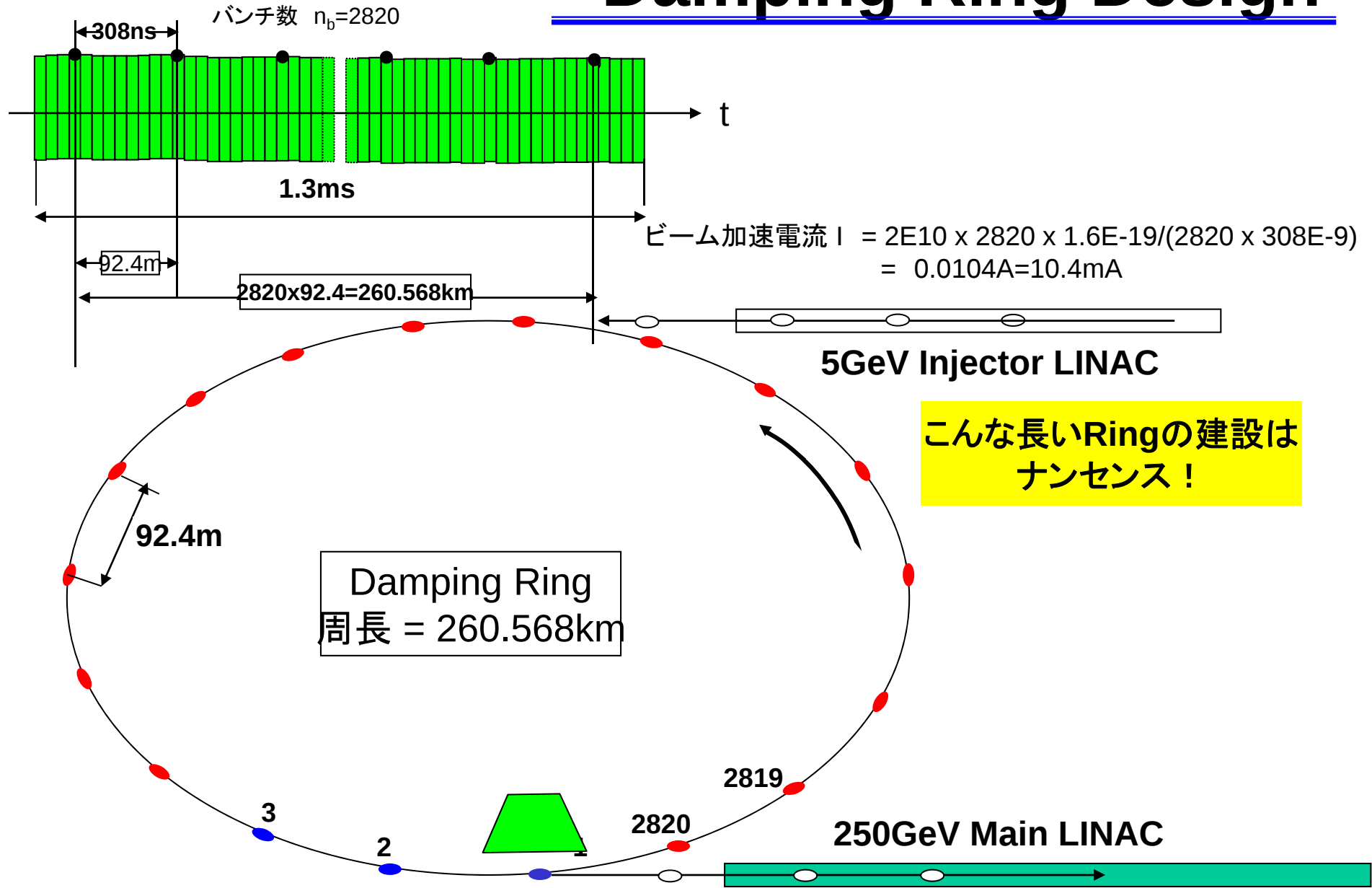
ビーム加速には使えないが冷凍負荷になる。繰り返しが多いとこの部分で効率が低下する。
パルス長を長くして、繰り返しを減らす。バンチ間隔が長くなるので、バンチごとのfeedback controlが可能になる。

ILC Baseline Parameter

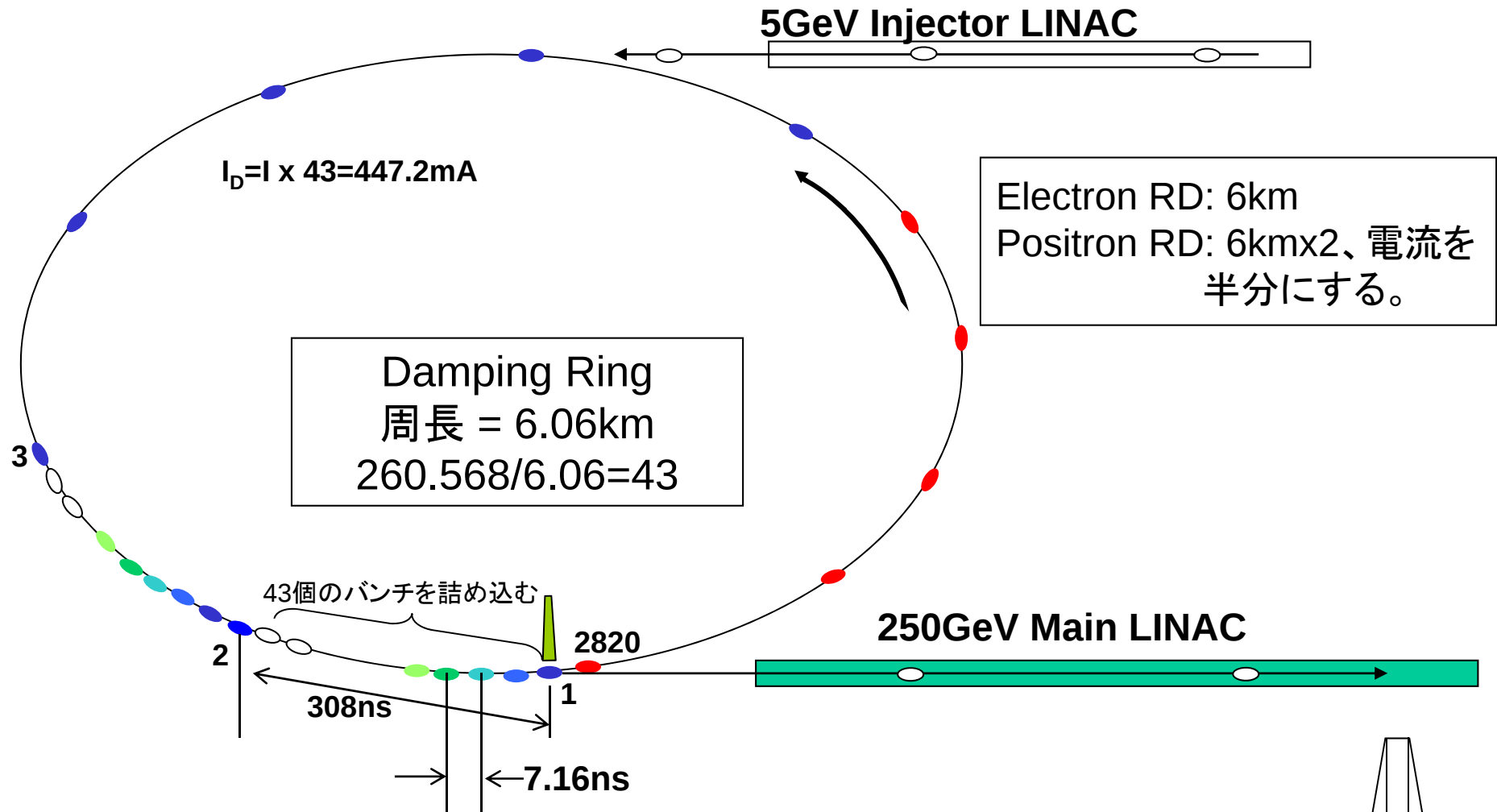
		min	nominal	max	
Bunch charge	N	1	2	2	$\times 10^{10}$
Number of bunches	n_b	1330	2820	5640	
Linac bunch interval	t_b	154	308	461	ns
Bunch length	σ_z	150	300	500	μm
Vertical emittance	$\gamma\epsilon_y$	0.03	0.04	0.08	mm.mrad
IP beta (500GeV)	β_x	10	21	21	mm
	β_y	0.2	0.4	0.4	mm
IP beta (1TeV)	β_x	10	30	30	mm
	β_y	0.2	0.3	0.6	mm

Table 1.1 Baseline Parameter

Damping Ring Design

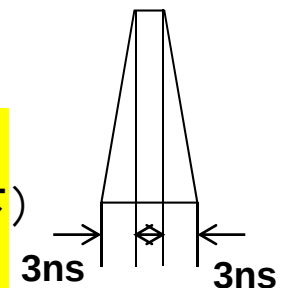


6km Damping Ring and R&D issues



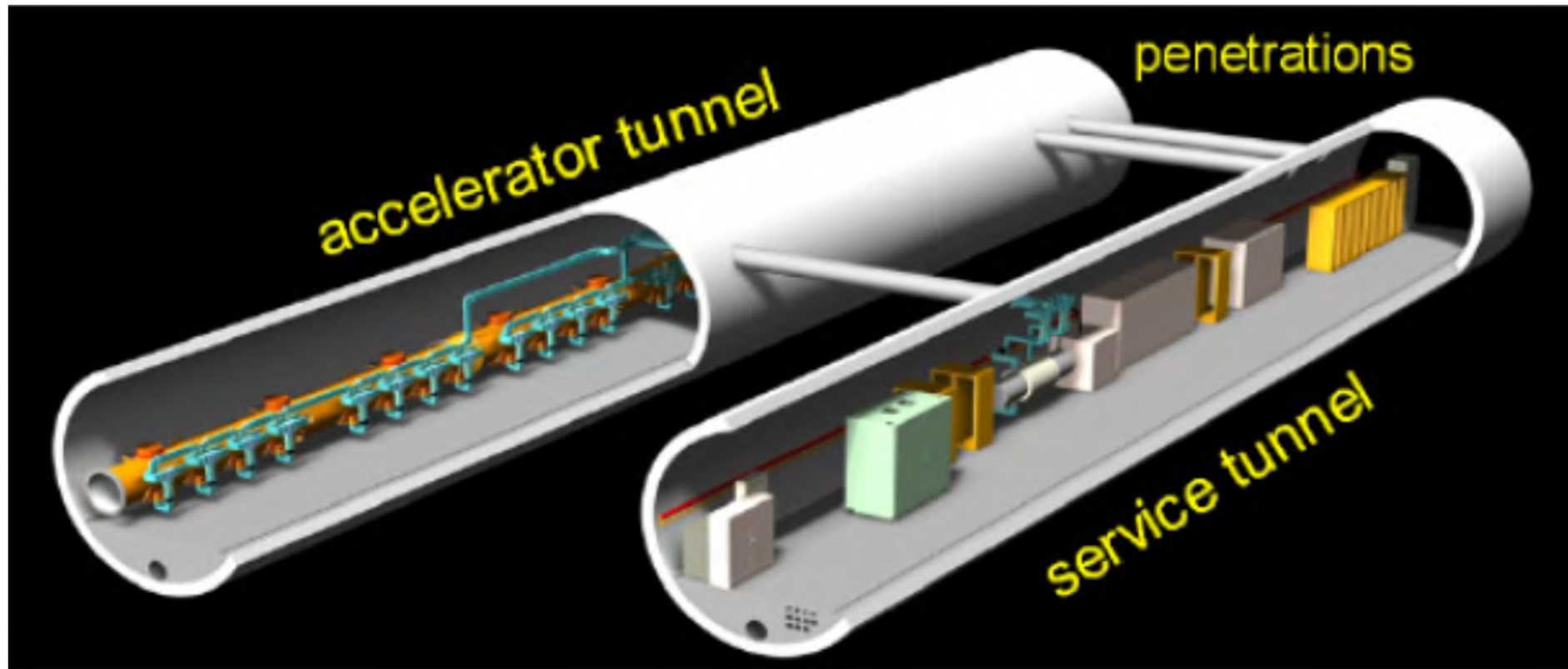
Damping Ringでの課題

- 1) 非常に速いビーム取り出しツキカーの開発 (立ち上がり3ns、立ちさがり3ns以下)
- 2) DRでの加速電流が43倍大きくなり、大電流加速技術が必要となる。
- 3) DRでのfast ion instability (electron DR)、electron cloud instability (positron DR, 12km)、特にRingの真空ダクトの開発。



ILC Main LINAC Tunnel

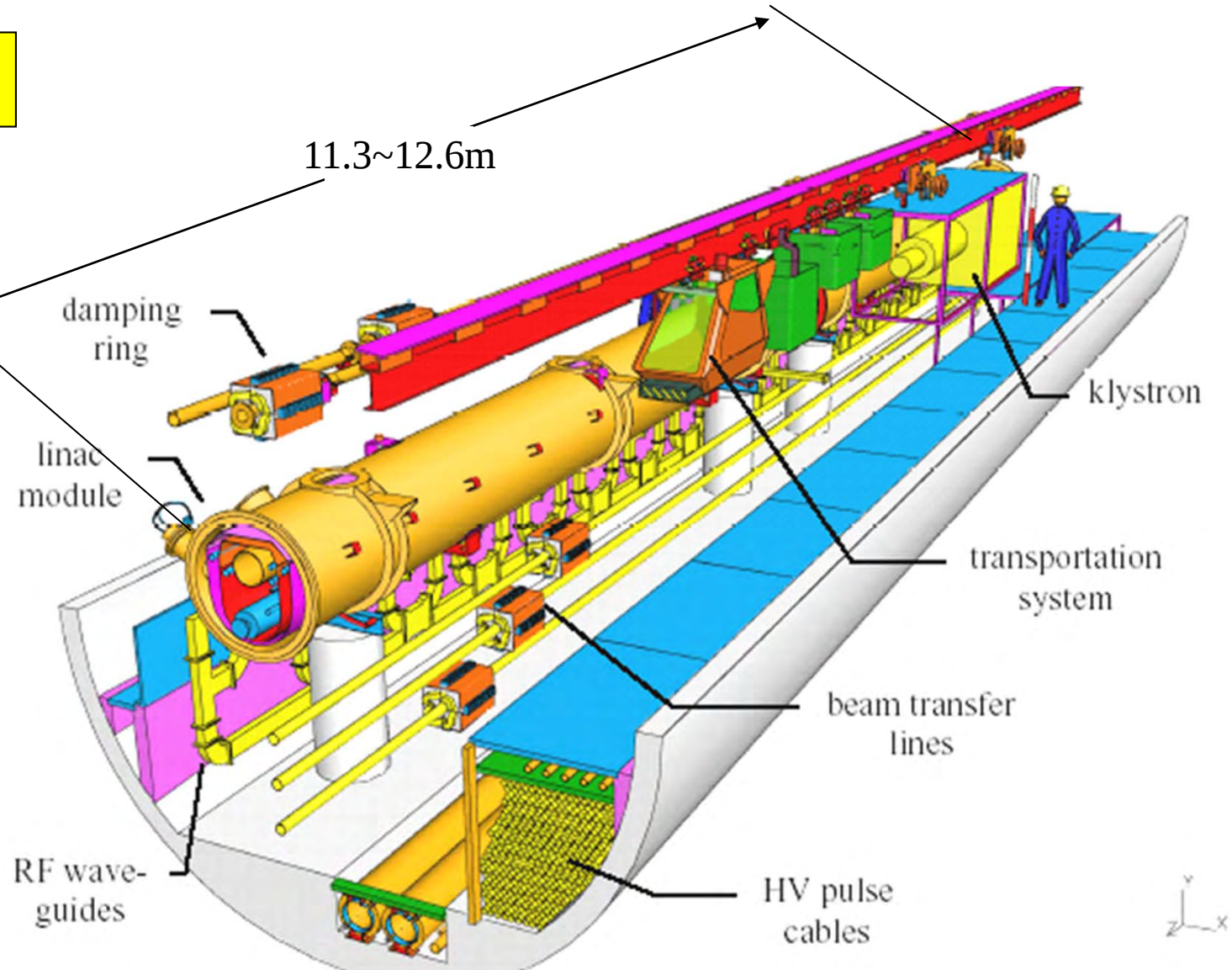
Two Tunnels





Cryomodule in the ILC Tunnel

1600台





TTF Cryostat Cross-section

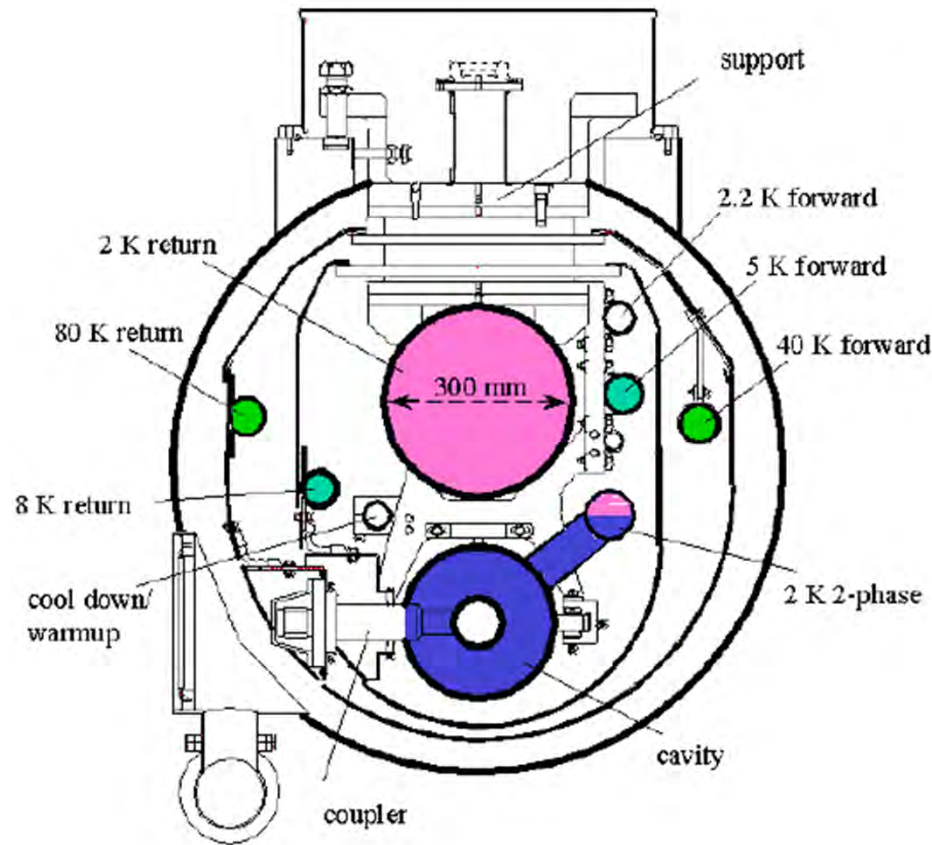


Figure 3.3.2: *Cross section of cryomodule.*



ILC SRF Cavity

TESLA Shape : BC

17000台

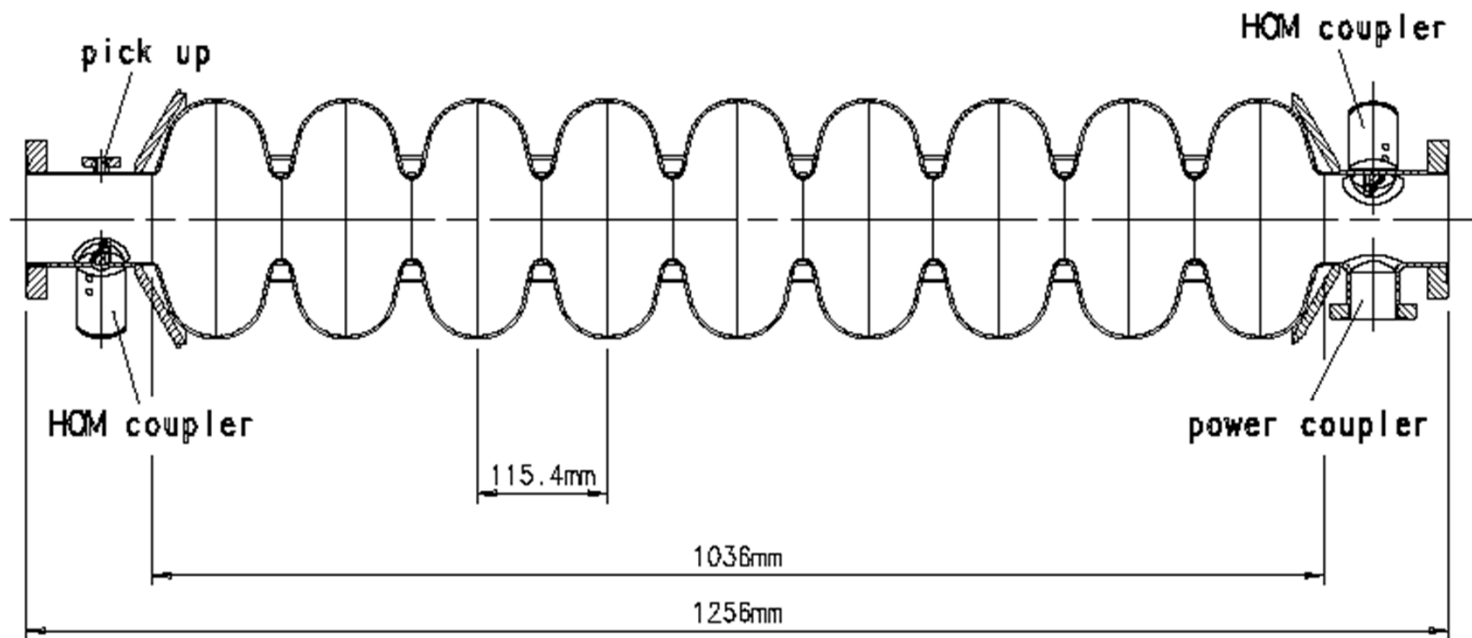
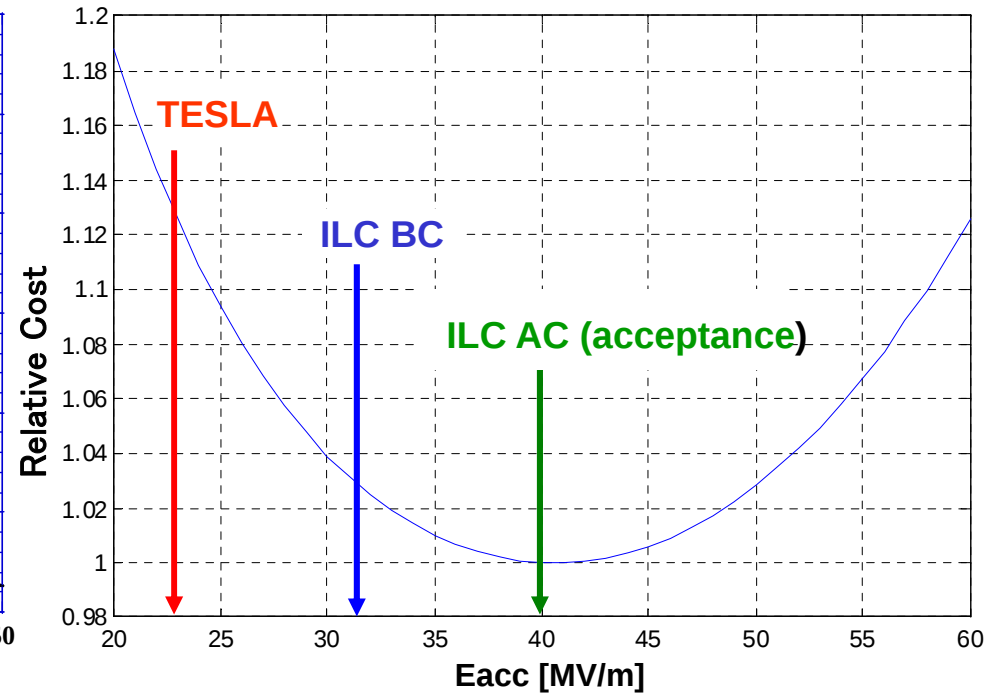
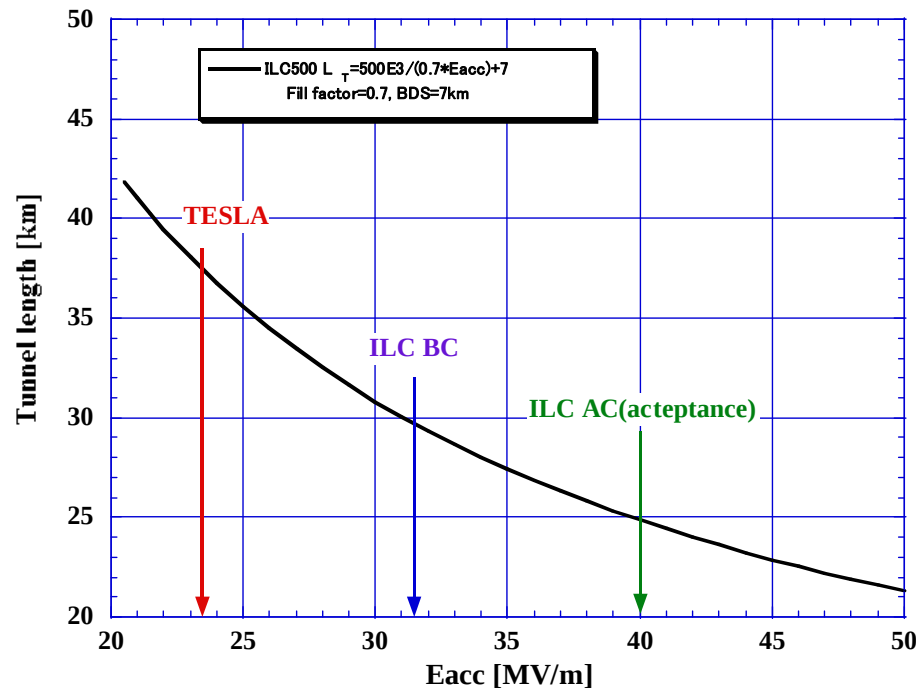


Figure 2.1.3: Side view of the 9-cell cavity with the main power coupler port and two higher-order mode couplers.

_C500 Gradient dependence with tunnel length and cost



$$\text{Total cost} = \text{Tunnel}(1/Eacc) + \text{Cryomodul}(1/Eacc) + \text{RF}(Eacc) + \text{Cryoplant}(Eacc^2) + \text{Cryo-Operation}(Eacc^2) + \text{Beampower(const)}$$

$$= [C_T + C_{CM}] \cdot \frac{1}{Eacc} + C_{RF} \cdot Eacc + [C_{Cryplant} + C_{Cryoop}] \cdot Eacc^2 + C_{Beampower}$$

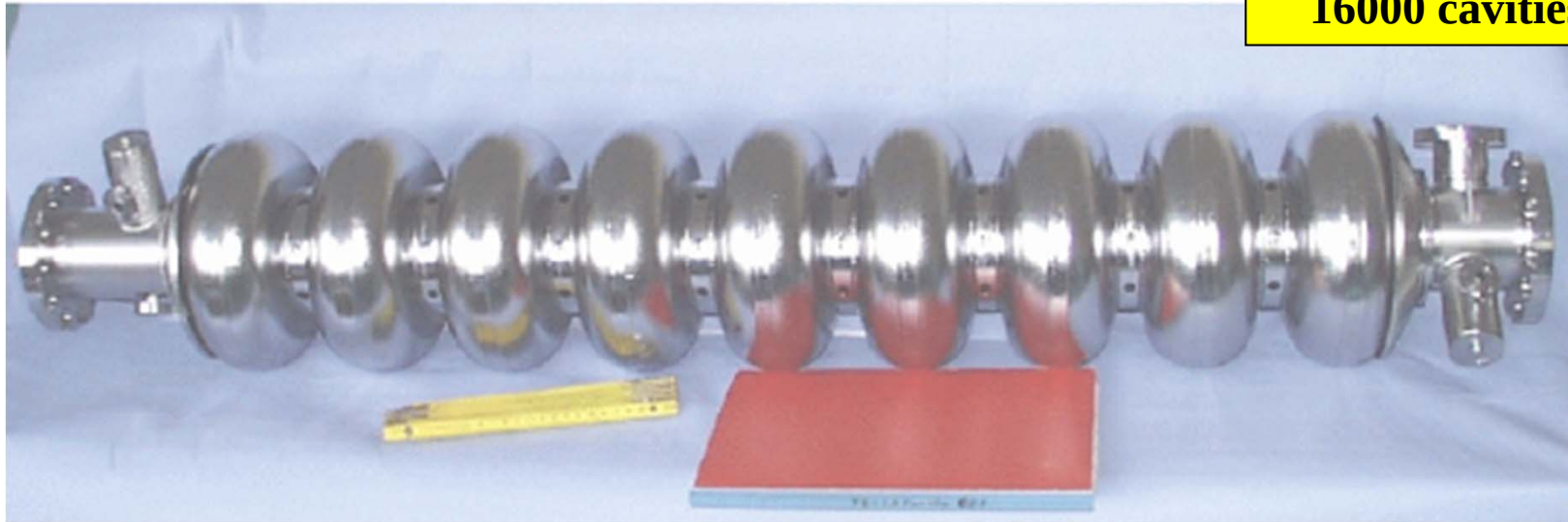
ILC Baseline of the main LINAC cavity

ILC parameters related to SCRF		BCD: Baseline	ACD: Alternative
Cavity Shape		TESLA	Low loss Reentrant
Acceptance Performance	Gradient [MV/m]	35	40
	Q ₀	0.80E10	0.80E10
Operation Performance	Gradient [MV/m]	31.5	36
	Q ₀	1.0E10	1.0E10
Cryomodule CM	Type	Type-IV	
	Number of cavity in one CM	8	8
Input coupler		TTF-III type	CC coupler, Double window type
Tuner		NO BCD	TESLA-type, Coaxial ball, Jack

ILC SRF Cavity

BCD Cavity shape : TESLA

16000 cavities



ACD cavity shape : LL



1.2 次世代放射光源への超伝導空洞 の応用 -XFEL, ERL-



Ring 加速器による放射光源

Ringでは電子が放射光を放出する。

一周当りに失うエネルギー損失

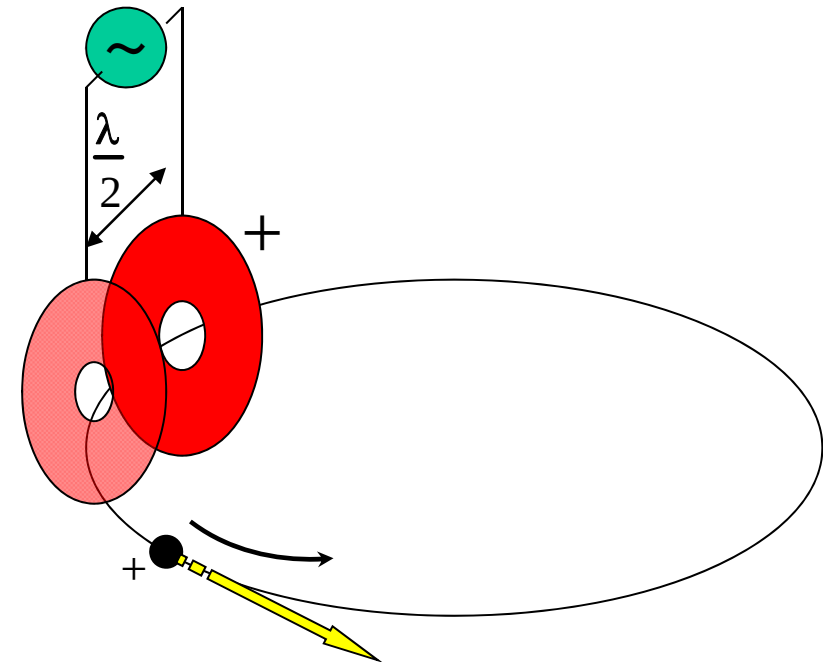
$$U = \frac{4\pi}{3} \cdot \frac{r_e}{(mc^2)^3} \cdot \frac{E^4}{\rho}, \quad U(\text{keV}) = 88.5 \cdot \frac{E^4(\text{GeV})}{\rho(\text{m})}$$

E: 電子のエネルギー、 ρ : 磁石の曲率半径

r_e : 電子古典半径

KEKB $\rho \sim 250\text{m}$, $E=8\text{GeV}$ $U=1.45\text{ MeV}$

電子がRing一周当り放出する放射光エネルギー
＝加速で貰うエネルギー
で加速が止まる。



放射光
(色々な異なる波長の白色光)

リングを電子が回っている間に、エネルギーの高い電子程多くの放射光を出すので、ビームが”冷えて”ビームのエミッタンスがよくなる(ランダウダンピング)。

電子シンクロトロンでの初めての放射光の観測

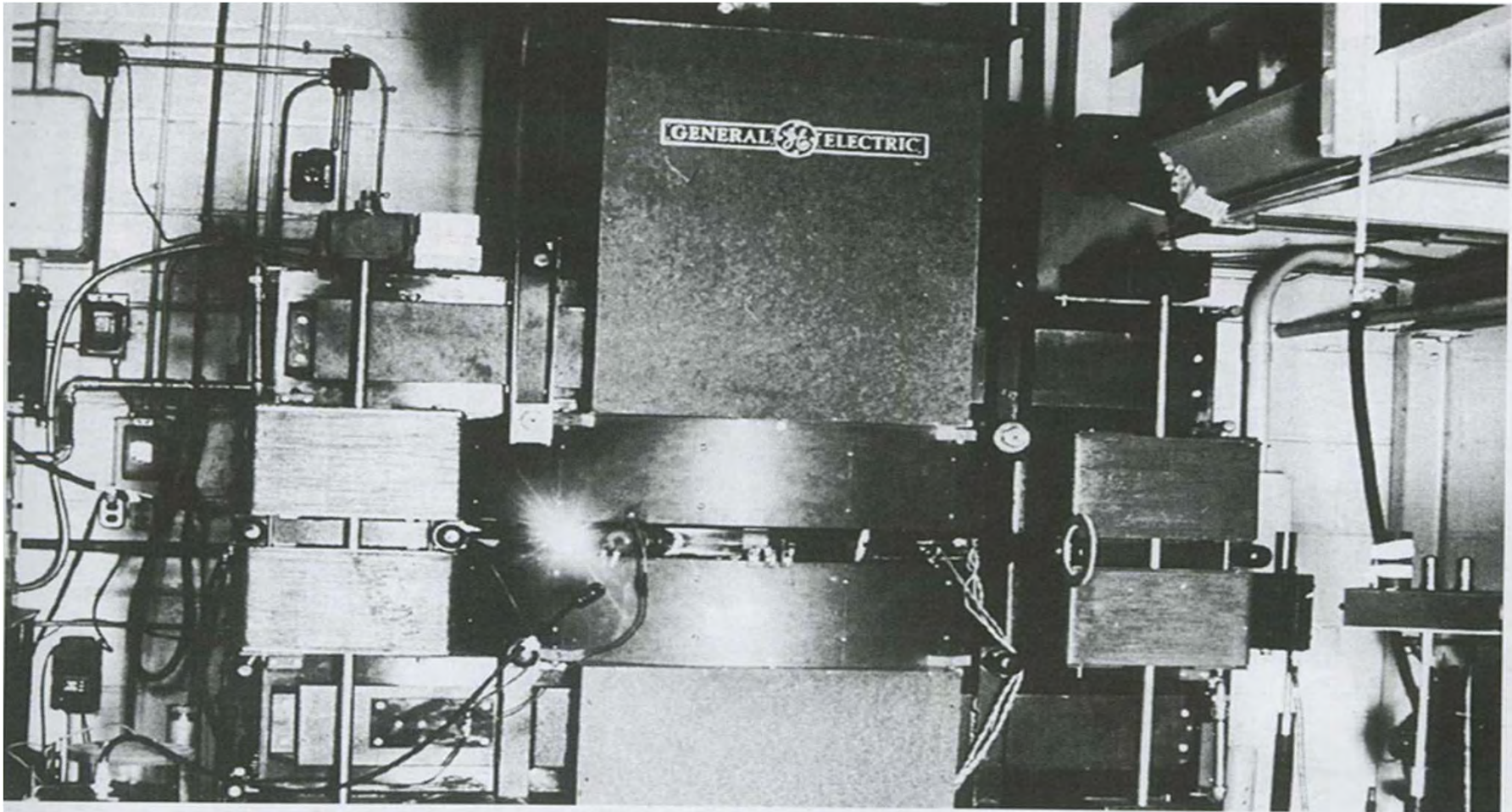


Fig. 5.2 This 300 MeV electron synchrotron at the General Electric Co. at Schenectady, built in the late 1940s, was the first purpose-built synchrotron. The photograph shows a beam of synchrotron radiation — the first to be observed — emerging from its glass vacuum chamber.

世界の放射光加速器施設の代表例

施設名称	SPring-8	APS Advanced Photon Source	ESRF European Synchrotron Radiation Facility
設置者 設置場所	原研・理研 播磨科学公園都市	米国エネルギー省 アルゴンヌ(米)	ヨーロッパ18カ国 グルノーブル(仏)
エネルギー ビームライン 周長	8 (GeV) 62本 1,436m	7 (GeV) 68本 1,104m	6 (GeV) 56本 844m
年次準備 計画建設 利用	1987～1989 1991～1997 1997～	1986～1988 1989～1994 1996～	1986～1987 1988～1994 1994～

Spring-8 HPより

世界には沢山の放射光施設がある。

ESRFや
台湾Light Sourceでは超伝導空洞が使われている。



最近では、超伝導空洞が主流になっている。
運転の経済性、
大強度のビームを加速できる。

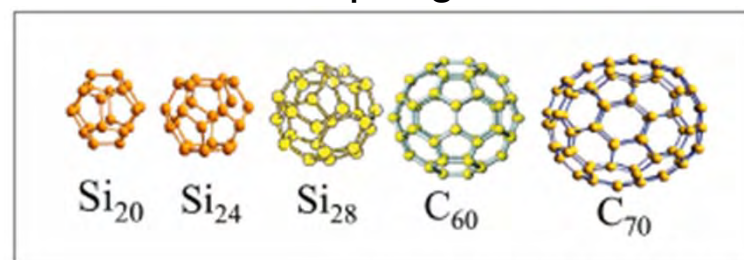
図3 第3世代の大型放射光施設とその他の主な放射光施設

[出所] (財)高輝度光科学研究センター; SPring-8について、概要、放射光の発生と性質、
http://www.spring8.or.jp/j/general_info/overview/

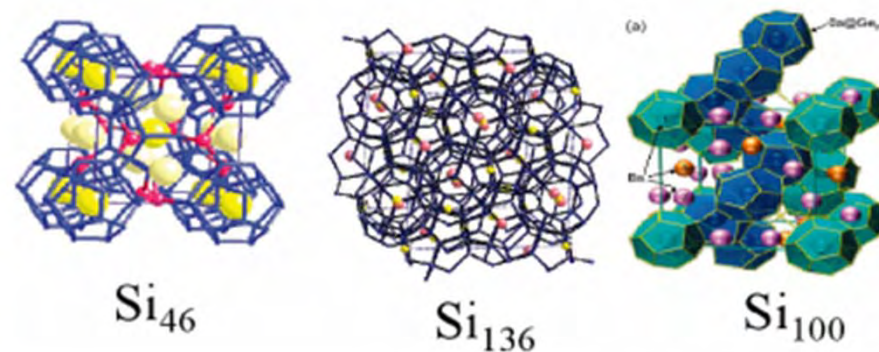
Spring-8 (兵庫県播磨)



Spring-8 HPより



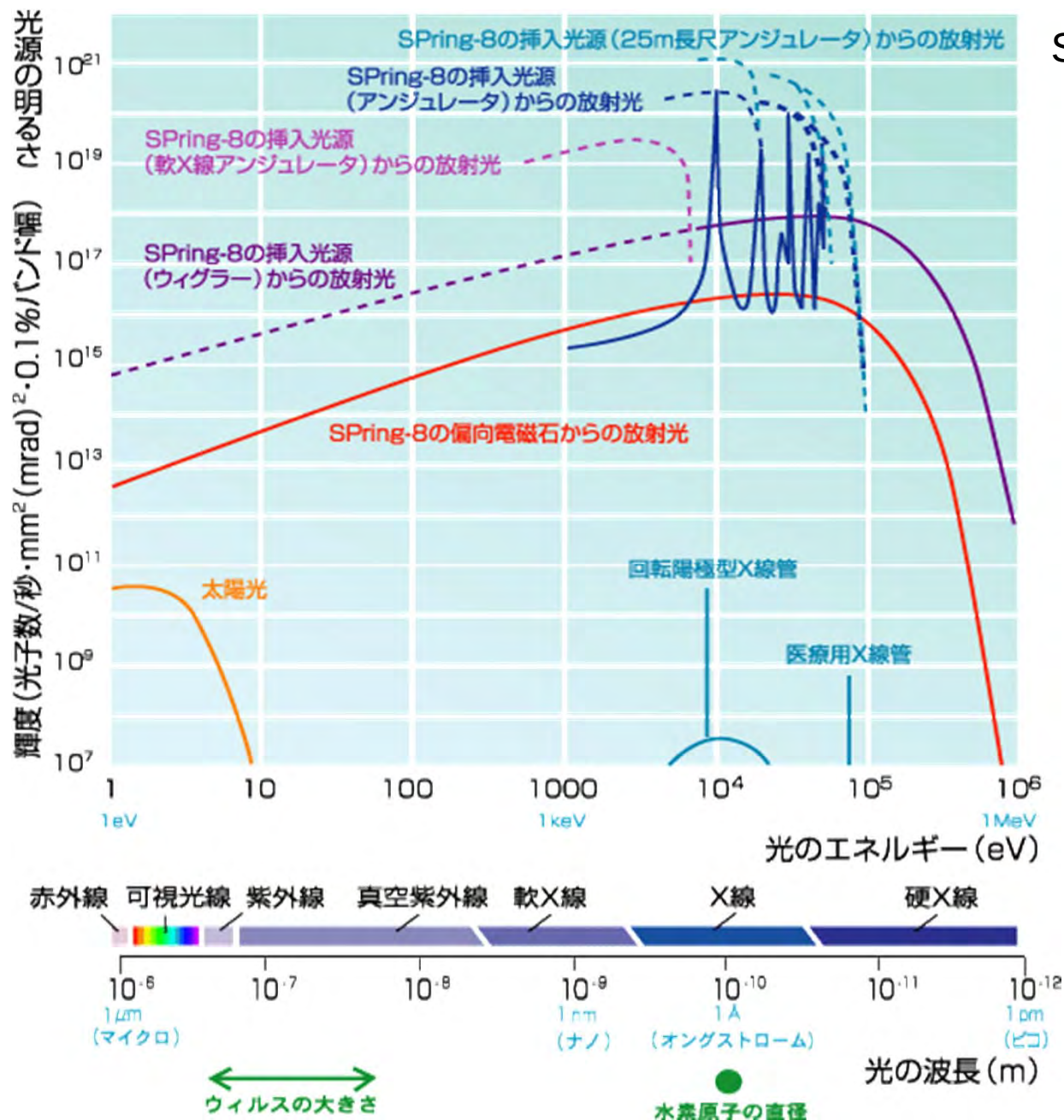
ナノクラスターC₆₀とその関連多面体クラスター



クラスタから構築される種々の結晶

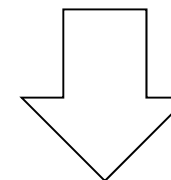
物質、タンパク質の分析など大いに活躍している。
和歌山県で起きたカレーヒ素中毒事件の時、ヒ素の分析でも有名。

放射光源の光の波長とその強度(明るさ)



Spring-8 HPより

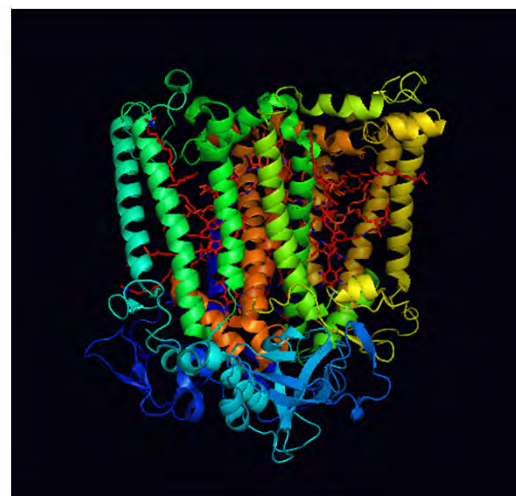
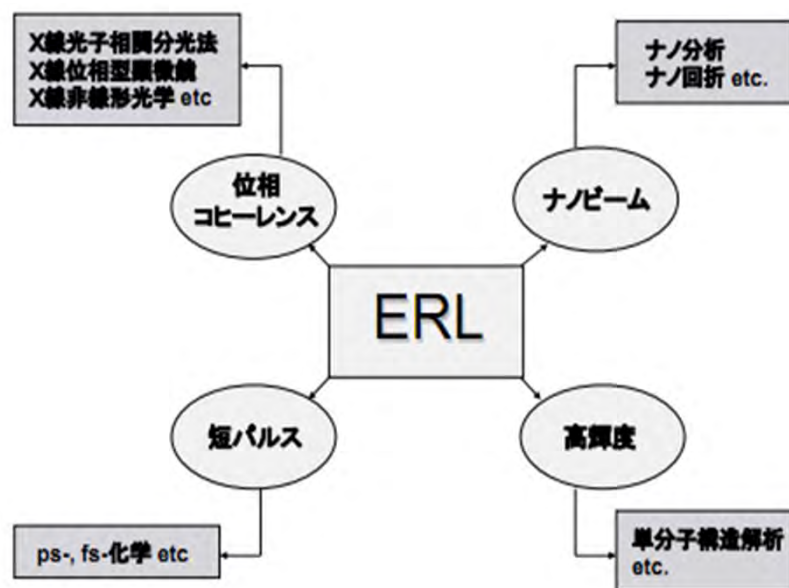
現世代の放射光では、白色光の中から実験に有効な波長領域を切りだして使う。



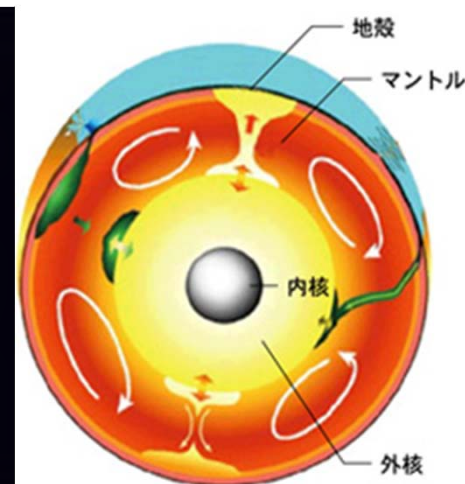
強度が低い。
位相が揃っていない。

次世代放射光科学を開拓するXFEL, ERL

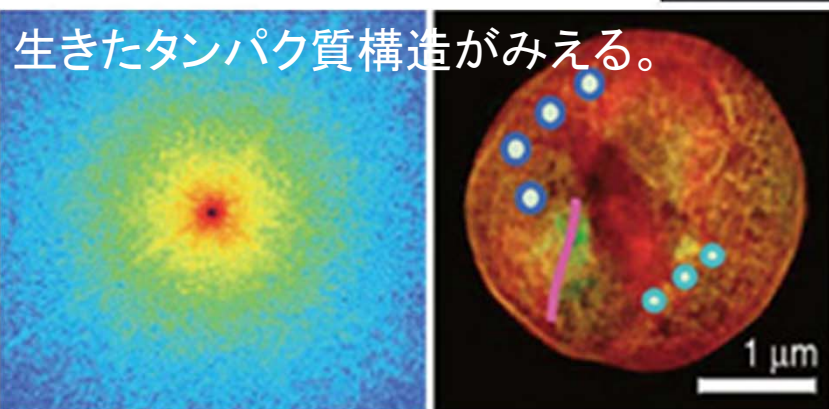
- Short time scale(femt-second)での現象解析
蛋白質の構造・機能解析、触媒・Radical 反応の解析 等
- 位相の揃った高輝度、高エツミタンスbeam



光合成反応中心タンパク質複合体の3次元構造



木星や土星など巨大惑星の中心部を再現し、ナノビームで探れば、金属水素を捉える



生きたタンパク質構造がみえる。

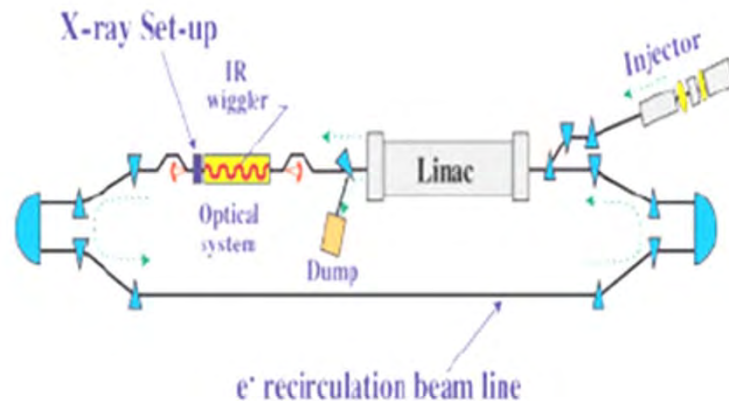
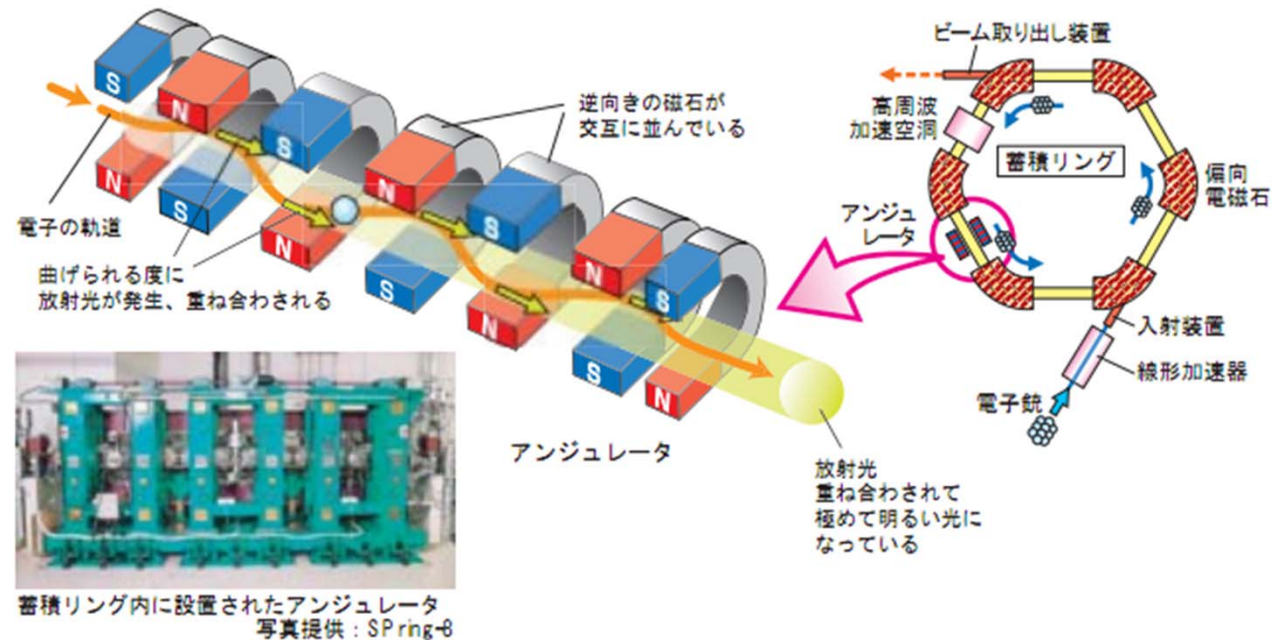
左図:酵母菌細胞の回折像

右図:左の回折像から構築した細胞のイメージ

(D.shapiro et al., PNAS. 102.(2005).)

Free Electron Laser

電子ビームが交番磁場(アンジュレーター)の中を走るとその進行方向に位相の揃った光(レーザー)を放射する。自由電子レーザー・SESEと呼ばれている。



超伝導空洞を使った加速器では、Jlabと原研・東海で初めて発振に成功した。

SASE(Self amplified spontaneous emission)

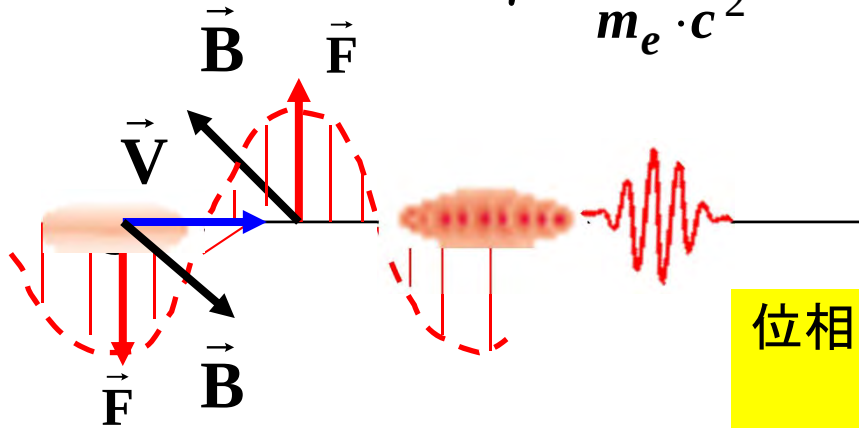
$$\gamma = \frac{E_e}{m_e \cdot c^2}$$

$$\lambda_{ph} = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} (1 + K_{rms}^2), \quad K_{rms} = \frac{eB_u \lambda_u}{2\pi m_e c}$$

λ_{ph} : wavelength of the emitted photon

λ_u : length of the magnetic period of the undulator

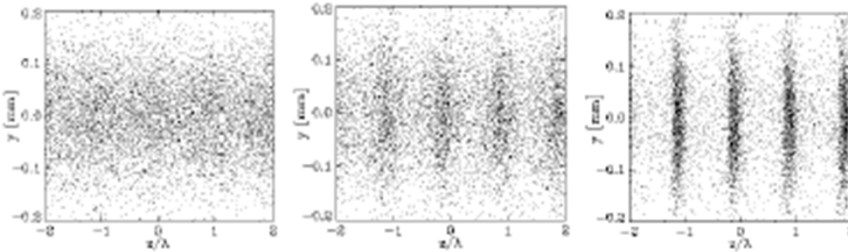
K_{rms} : averaged undulator parameter



位相の揃った高輝度、低エミッタンスbeam

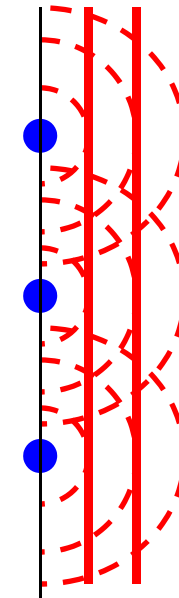
↓
新しい光科学

$$\vec{F} = e\vec{V} \times \vec{B}$$



Micro-bunching

レーザーの波長は、電子のエネルギーと交番磁場の周期で決まる。



波長可変
レーザー

理研のXFEL施設(Spring-8)

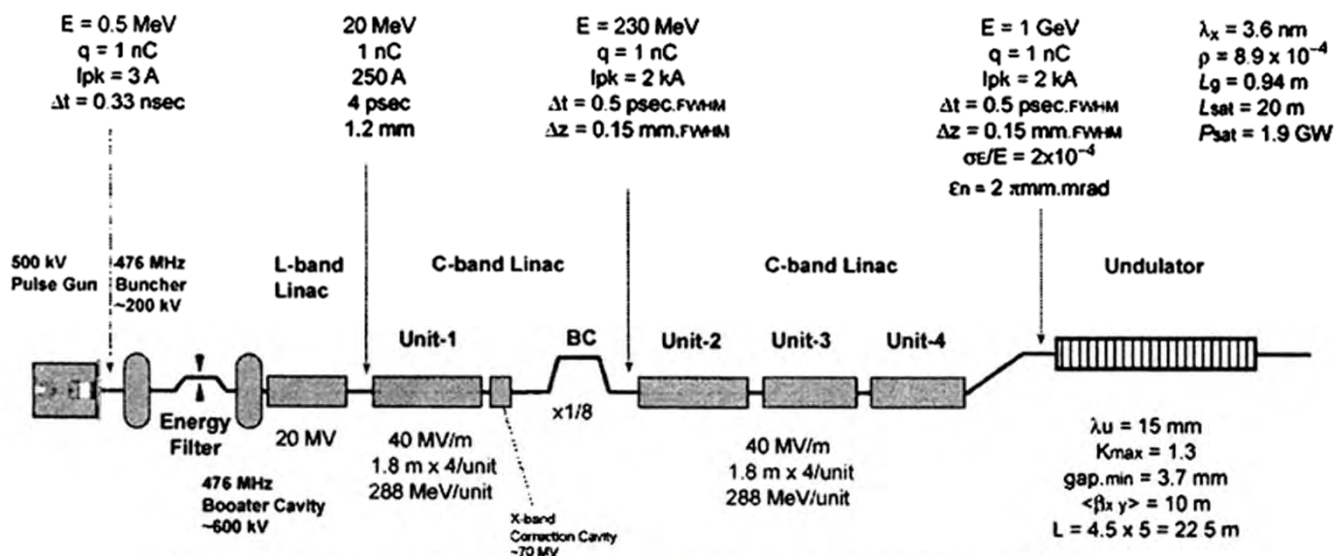


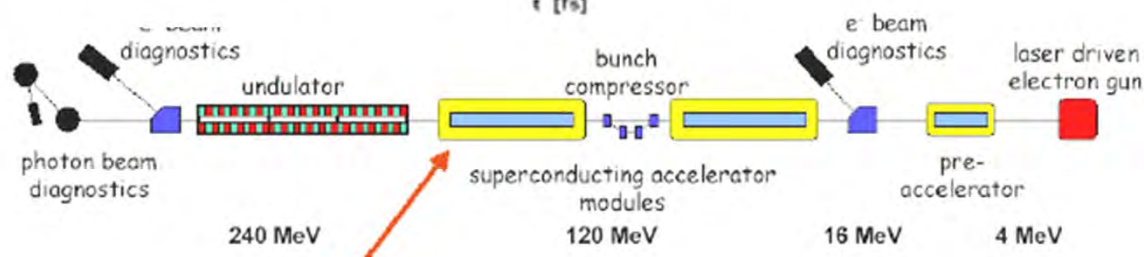
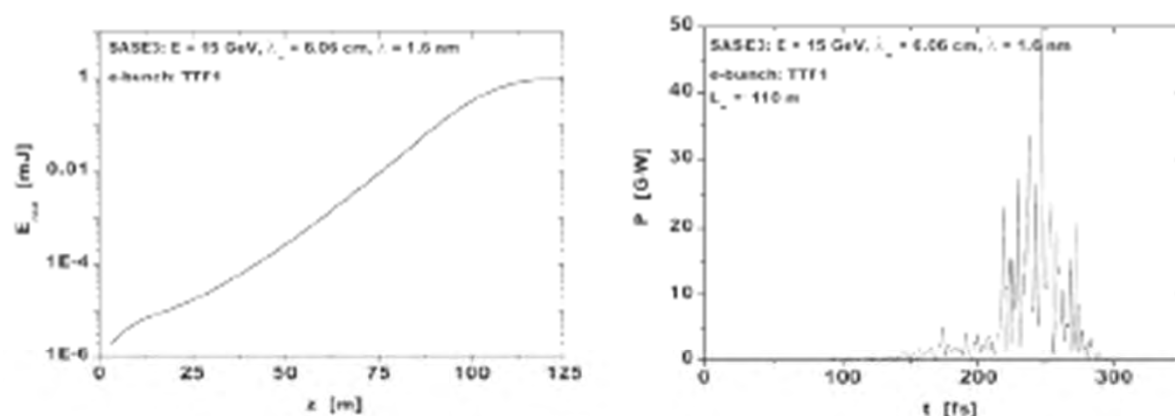
図5 SPring-8 Compact SASE Source配置図

[出典] T.Shintake et al.: Pro. 1st Ann. Meeting Particle Acc. Soc. Japan, (2004)45, J. Particle Acc. Soc. Japan, V.3, N.3(2006)284

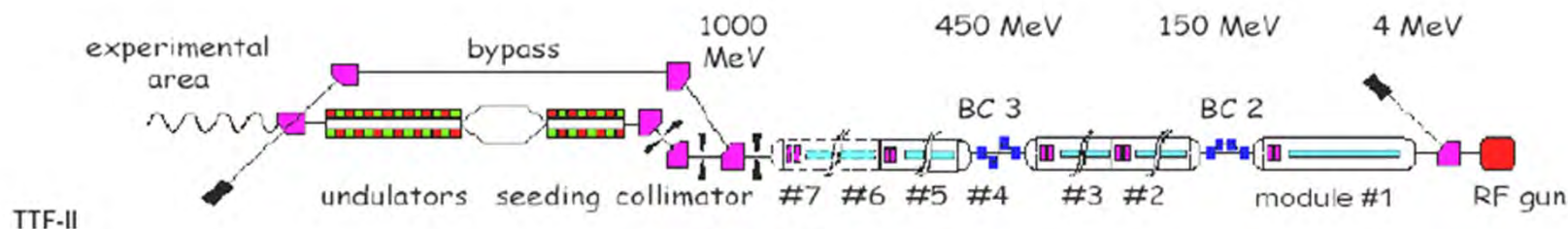
Excitation of SASE-XFEL in the TTF

Jlab,原研・東海の超伝導施設より大きな規模でのSASE発振: DESY TTF (FLASH)

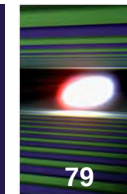
超伝導でのリニアコライダー:TESLAと並行して開発された。



超伝導リニアックでのSASE発振の成功



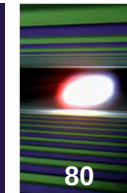
Overview EURO XFEL(14GeV)に進展



79



Accelerator Complex Start-up Version



80 accelerator modules

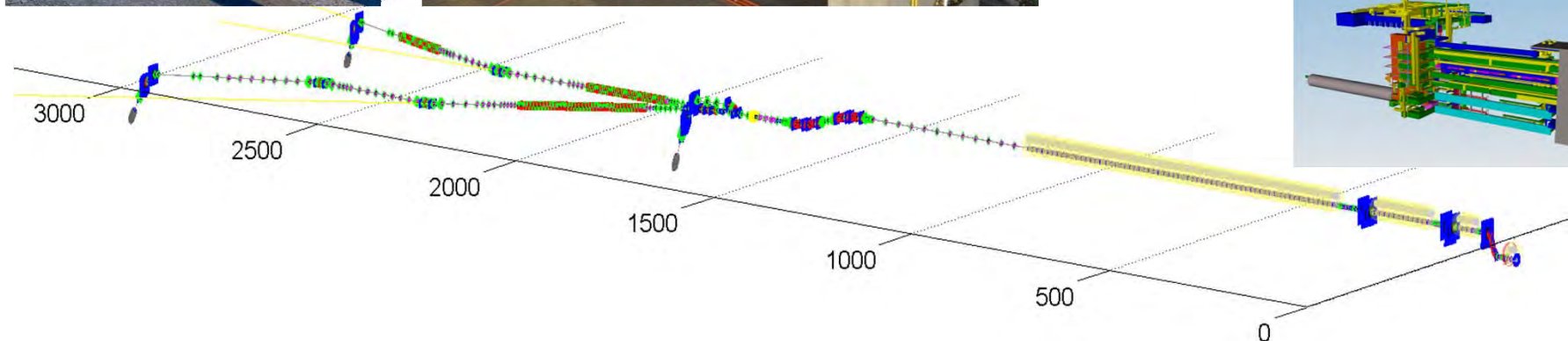
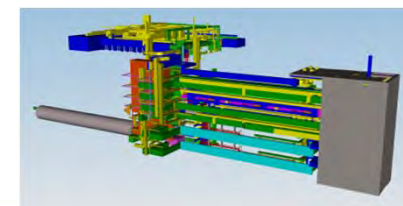


600台のTESLA 9-Cell
超伝導空洞が使われる。

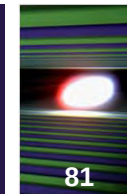
600 accelerating cavities
1.3 GHz / 23.6 MV/m



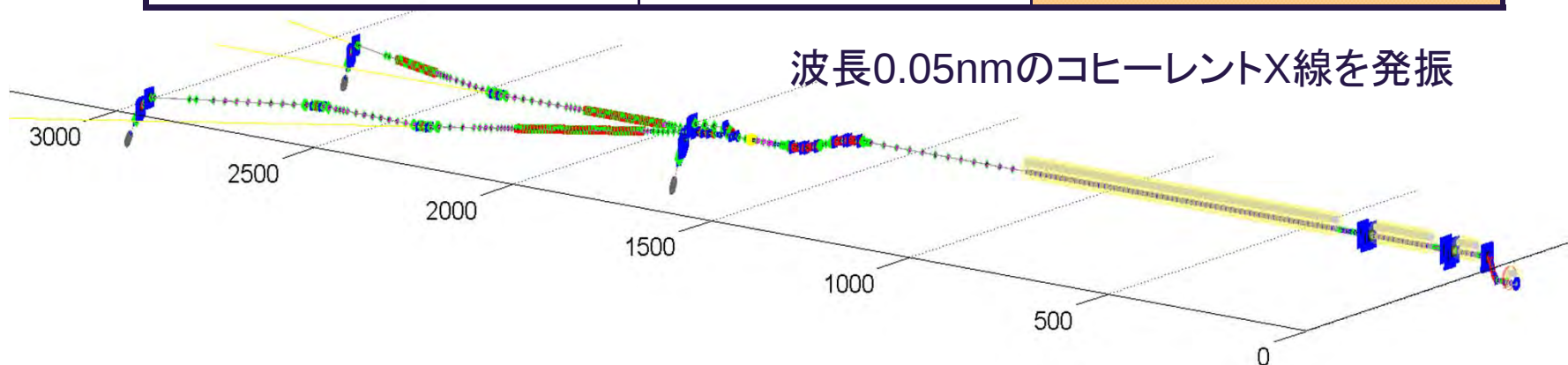
25 RF stations
5.2 MW each



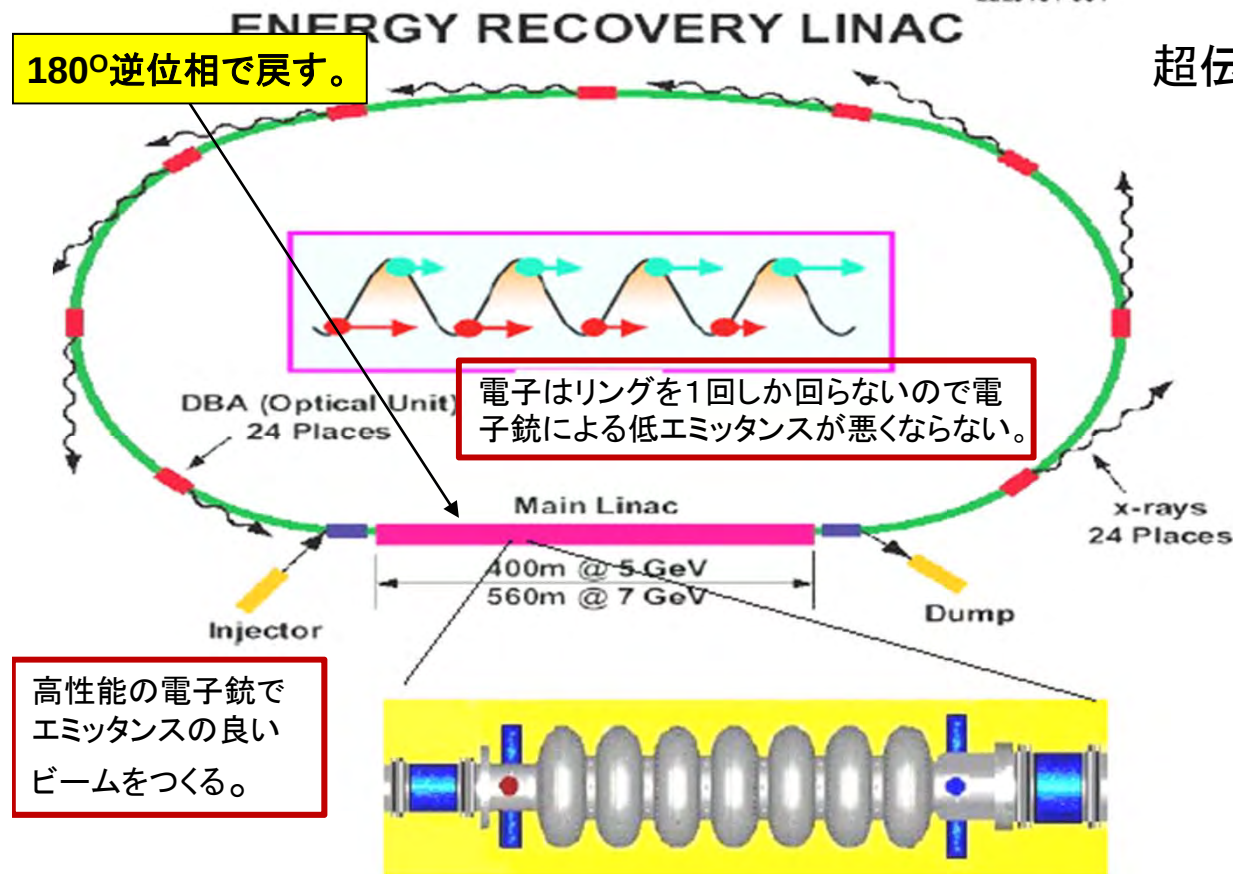
Accelerator Complex with New Parameter Set



	Baseline	New Parameter Set
Electron beam energy	17.5 GeV	14 GeV
Bunch charge	1 nC	0.02 - 1 nC
Peak current	5 kA	2 - 5 kA
Slice emittance	< 1.4 mm mrad	0.4 - 1.0 mm mrad
Slice energy spread	1.5 MeV	4 - 2 MeV
Shortest SASE wavelength	0.1 nm	0.05 nm
Pulse repetition rate	10 Hz	10 Hz
Bunches per pulse	3000	2700

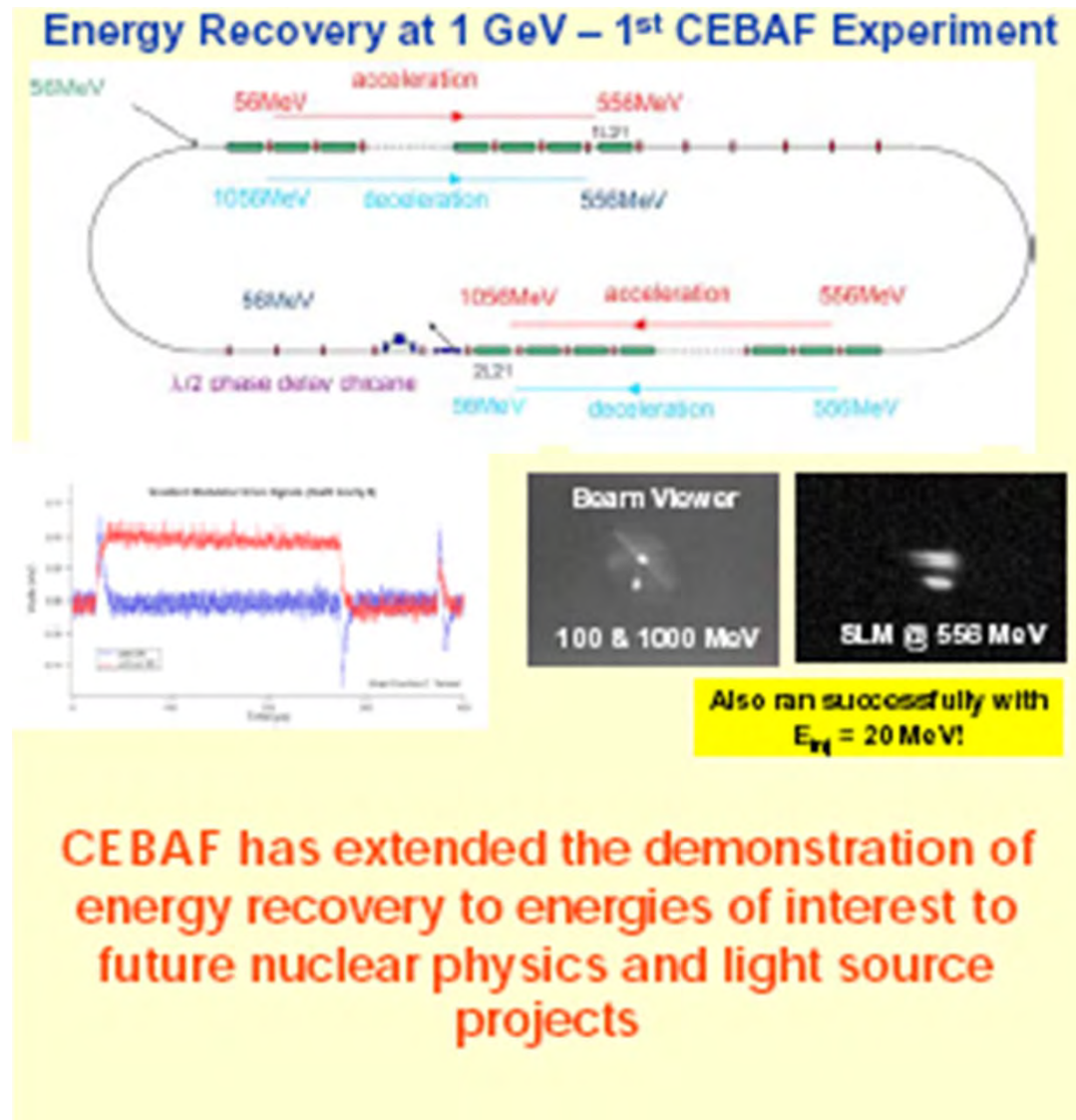


Energy Recovery LINAC (ERL)



エミッタンスの非常によい電子銃から発射された電子は、10MeVまで加速され、主超伝導リニアックで5GeV程度に加速され、アンジュレーターの並んだリングを一周する。主リングに戻ってきたビームは減速フェイズで主ライナックに戻される。ビームは減速されマイクロ波を吐き出し、自らは10MeVのエネルギーになってDumpに捨てられる。次にInjectorから主ライナックに入射された電子は、空洞に貯まったマイクロ波により加速されてリングを一周する。それ以後同じことが繰り返される。先行電子から後続電子へマイクロ波エネルギーが受け渡されるのでエネルギー回収される。

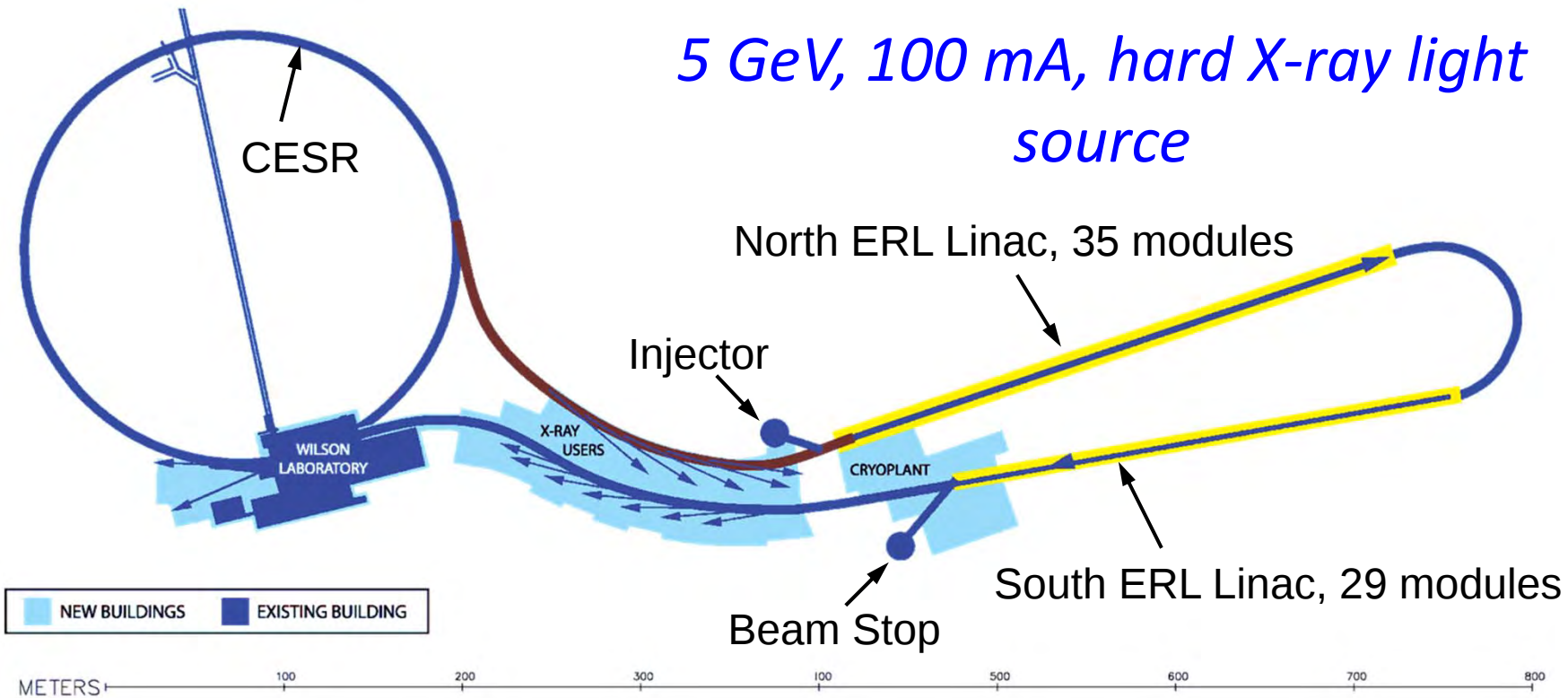
Successful 1GeV Energy Recovery in CEBAF



1GeVのエネルギー回収
に成功。

The Cornell Energy Recovery Linac Project

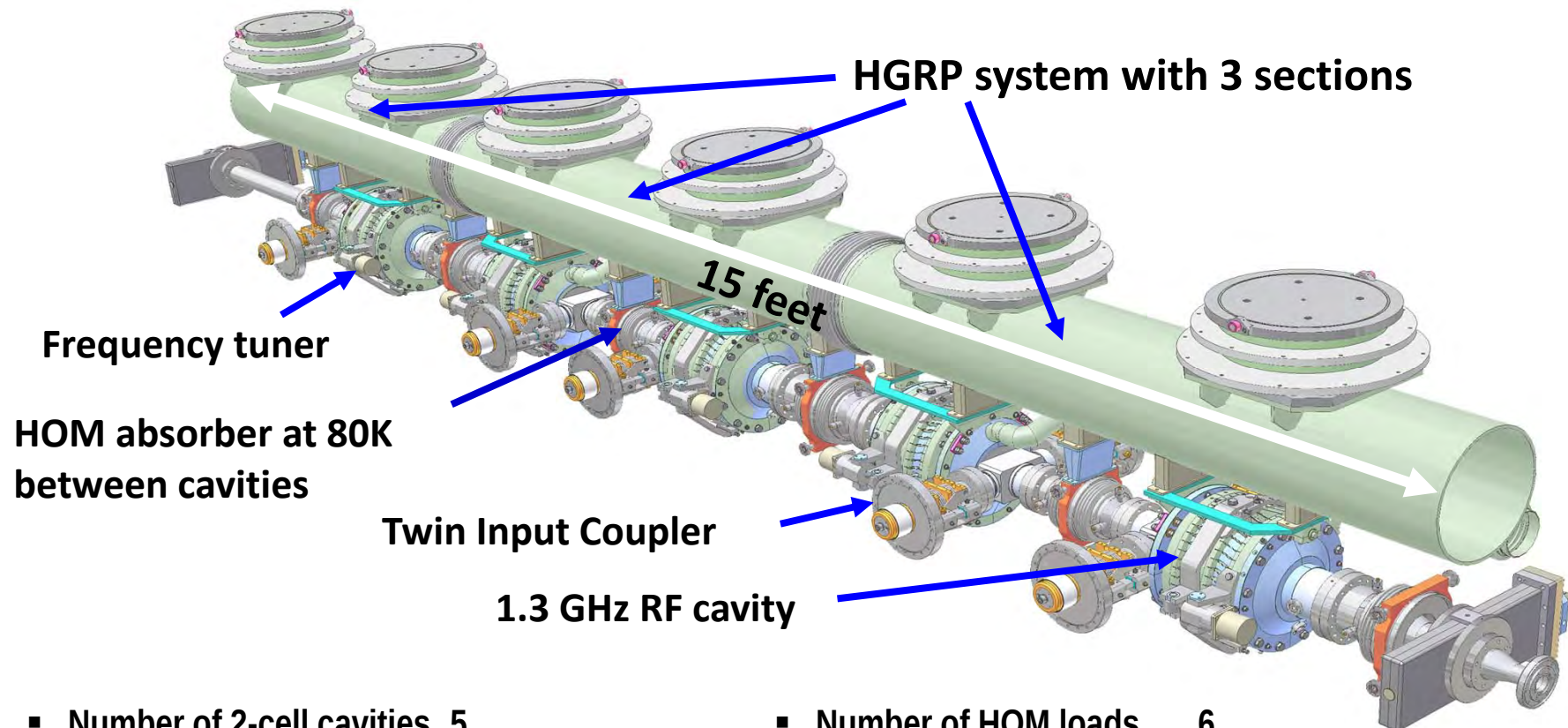
5 GeV, 100 mA, hard X-ray light source



The Cornell ERL

- Cornell is pursuing funding for a Energy Recover Linac (ERL) based x-ray light source.
- A project design and description report is completed.
- An ERL injector prototype has been developed, fabricated, and is currently under commissioning.
- Design work on the main linac cryomodule has started.

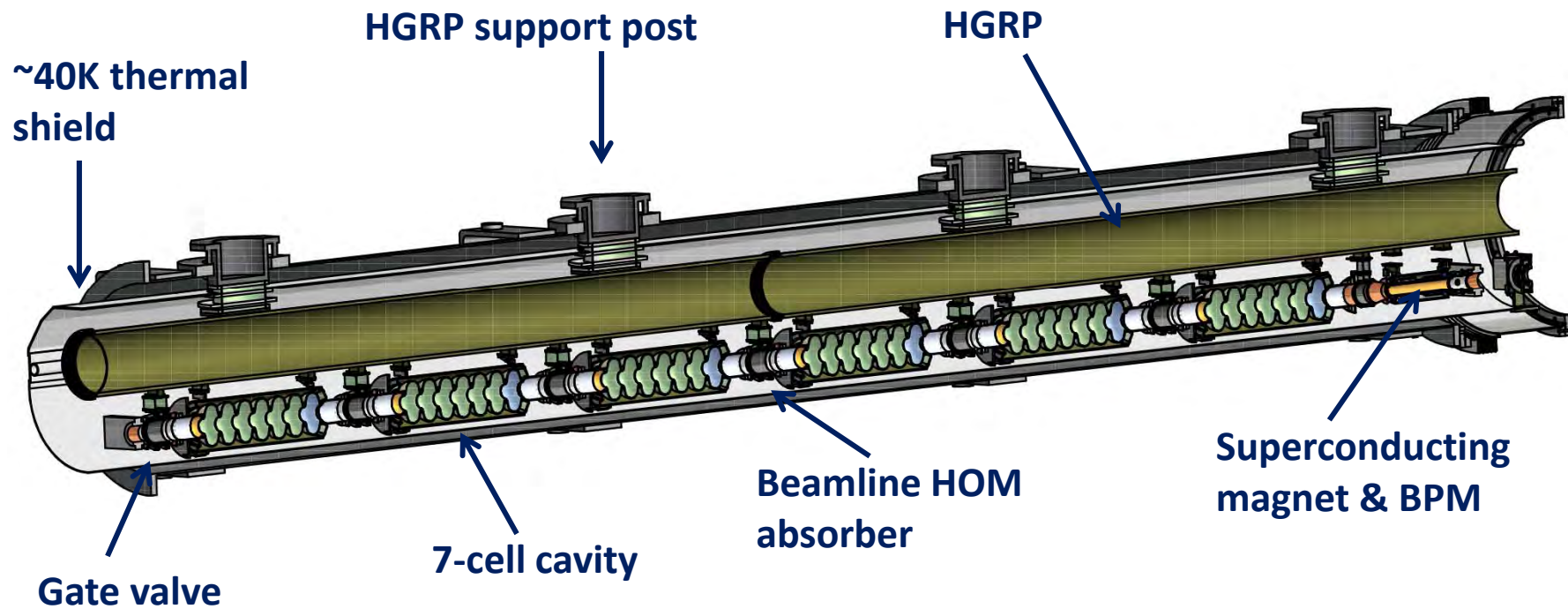
The Cornell ERL Injector Cryomodule



- Number of 2-cell cavities 5
- Acceleration per cavity 1 – 3 MeV
- Accelerating gradient 4.3 – 13.0 MV/m
- R/Q (linac definition) 222 Ohm
- Qext $4.6 \cdot 10^4 - 4.1 \cdot 10^5$
- Total 2K / 5K / 80K loads: 30W / 60W / 700W

- Number of HOM loads 6
- HOM power per cavity 40 W
- Couplers per cavity 2
- RF power per cavity 120 kW
- Amplitude/phase stability $10^{-3} / 0.1$ (rms)
- ICM length 5 m

Cornell ERL Main Linac Cryomodule



- Number of 7-cell cavities 6
- Acceleration gradient **16.2 MV/m**
- R/Q (linac definition) 774 Ohm
- Qext **6.5×10^7**
- Total 2K / 5K / 80K loads: **76W / 70W / 1500W**

- Number of HOM loads 7
- HOM power per cavity 200 W
- Couplers per cavity 1
- RF power per cavity **5 kW**
- Amplitude/phase stability 10^{-4} / 0.05 (rms)
- Module length 9.8 m

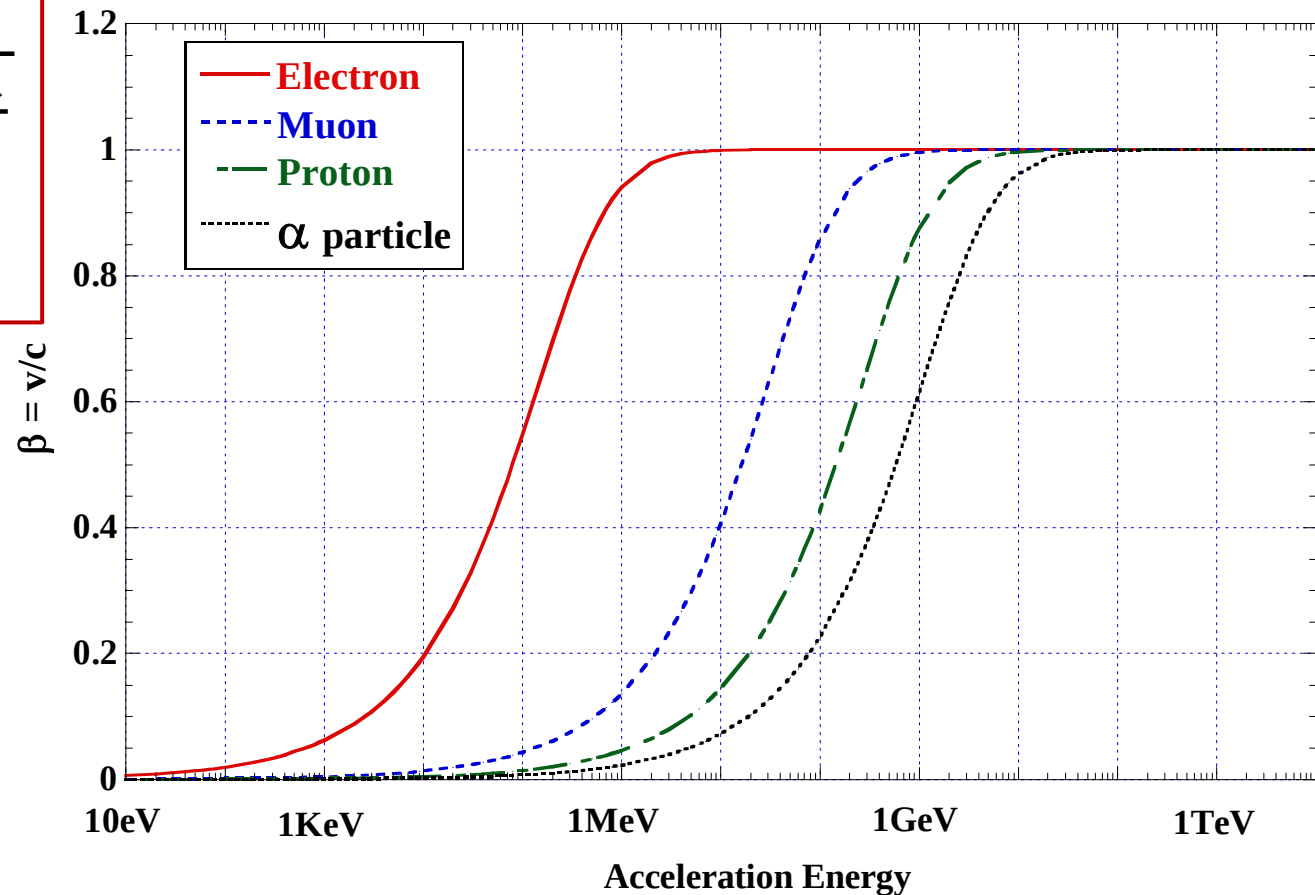
1.3 陽子加速器、重イオン加速器への応用

陽子、重イオンは加速してもなかなか速度が上がらない

電子に比べて、静止質量が大きいので加速エネルギーを与えても、なかなか高速度に近づかない。電子では10MeV加速すると高速度になる。一方、陽子では10GeVまで加速しないと高速度にならない。

演習問題2:

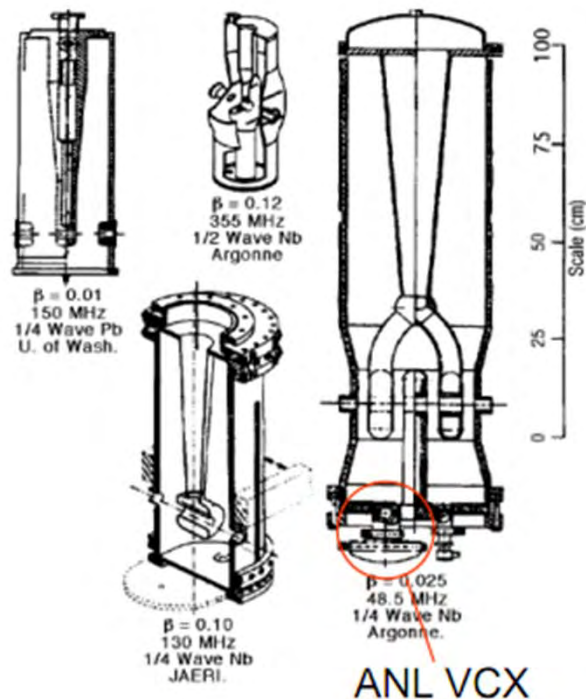
相対論を使って電子、ミュオン、陽子、アルファ粒子について加速エネルギーと速度 $\beta(=v/c)$ の関係を計算し、右図のグラフを作れ。



静止質量の運動エネルギーまで加速した時 $\beta = \sqrt{0.75} = 0.886$

SC low- β resonators : 80's

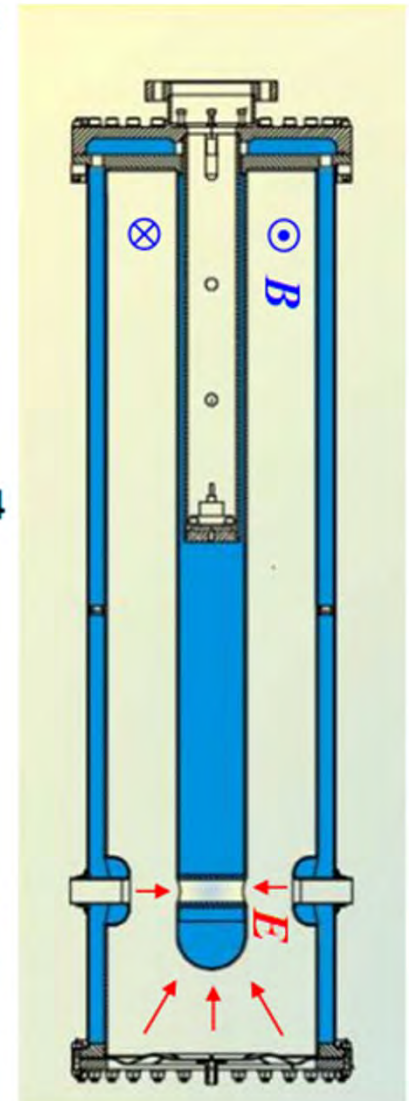
Low- β 空洞については後期授業で行う。



- First low- β SC Positive Ion Injector at ANL:
 $\beta \sim 0.001 \div 0.2$
- All ion masses
- New materials:
 - Explosive bonded Nb on Cu**
- Mechanical stability problems solved by electronic fast tuners VCX at ANL
- E_a typically **3 MV/m**; first operation above **4 MV/m**

Low- β cavities in the 80's

加速ギャップを β に合わせて調整する必要があり、構造が複雑。



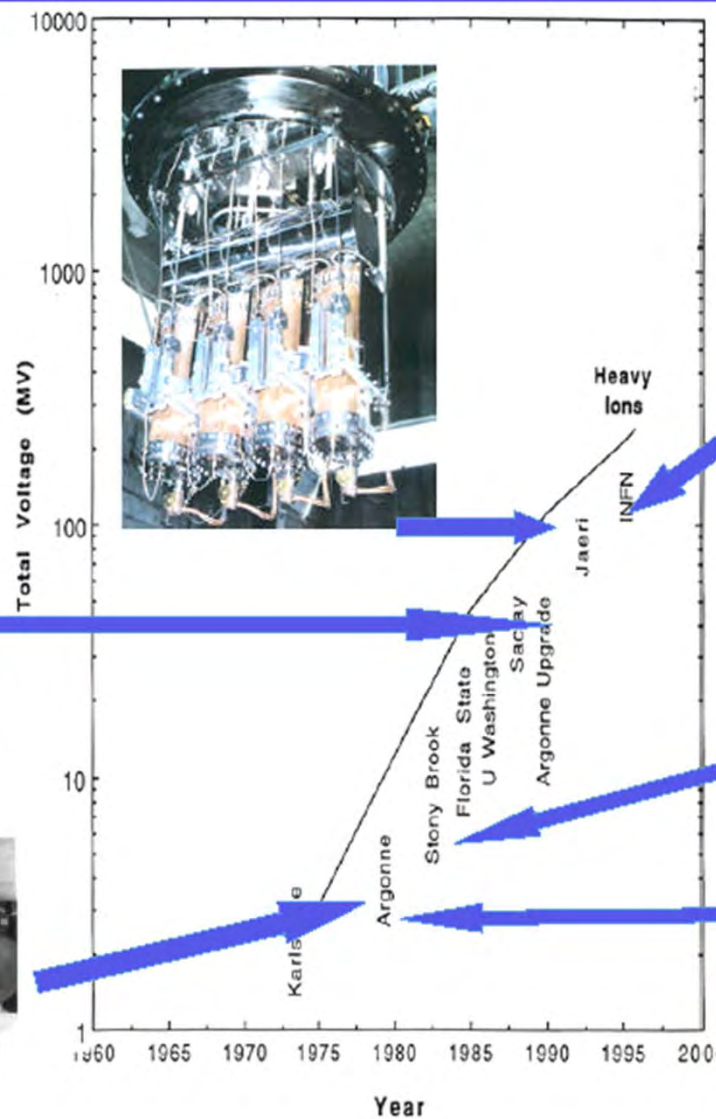
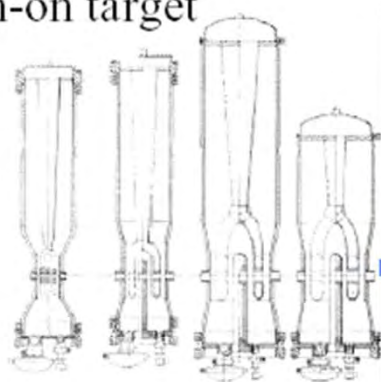
電子加速用空洞

NUCLEAR SCIENCE WITH SUPERCONDUCTING HEAVY-ION ACCELERATORS

10 Facilities World Wide

> 270 resonators

> 120,000 hours of
beam-on target



超伝導陽子線形加速器 -例SNS-

大強度陽子ビームの世界

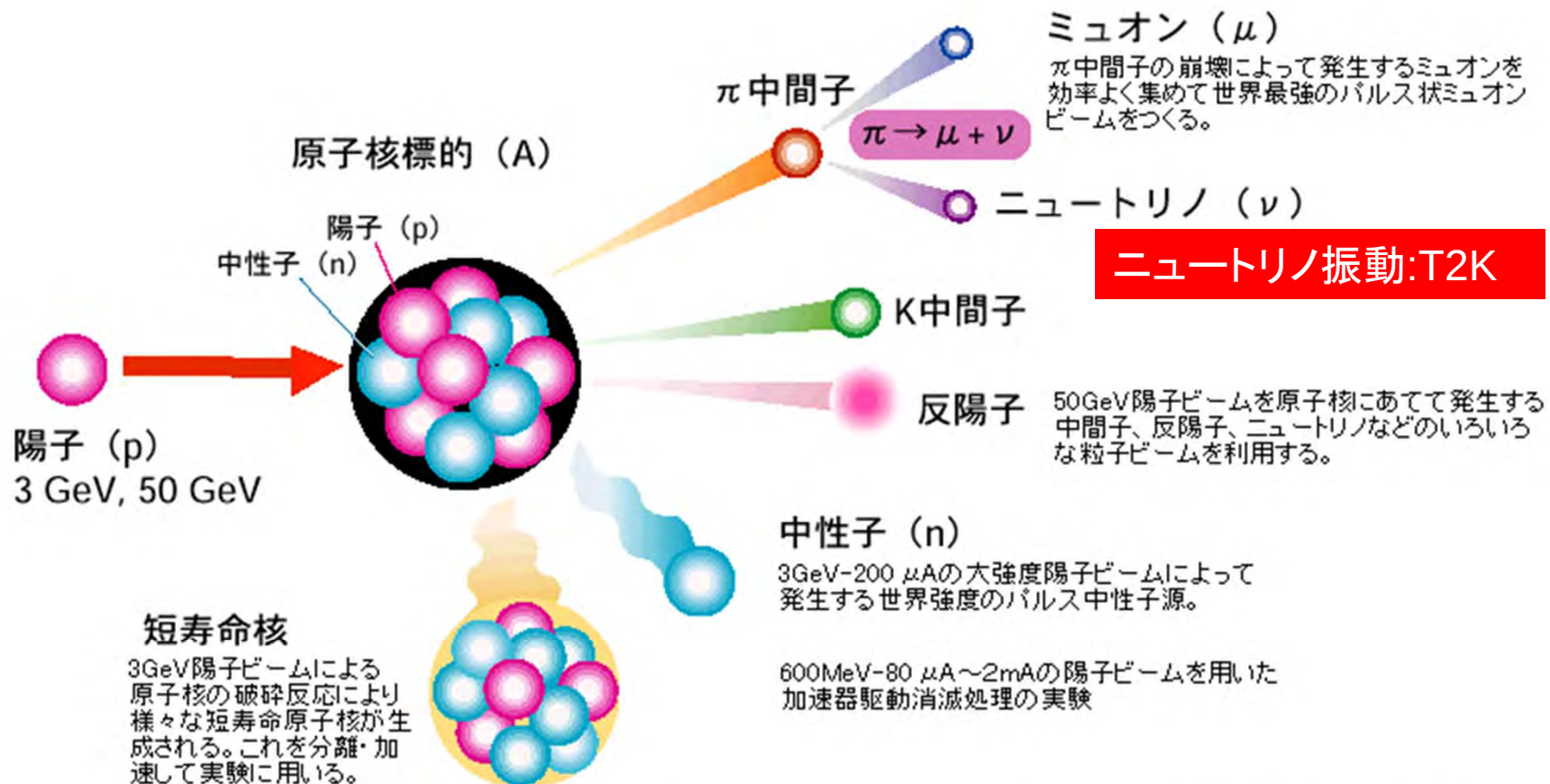


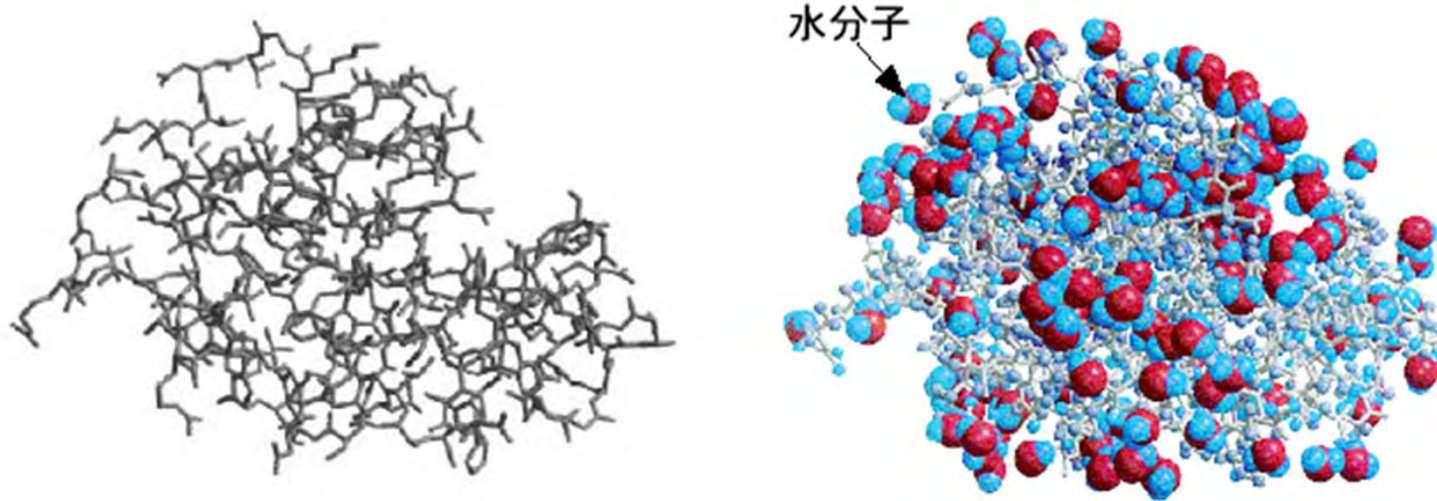
図1 大強度陽子ビームによる2次粒子とこれを用いて展開される科学

[資料提供] 日本原子力研究所

中性子ビームが切り開く新展開

生命のなぞに挑戦する構造生物学

タンパク質は水分子で3次元の立体構造が保たれ、生命活動を営むことができる



X線で見た構造

中性子で見た構造

ニワトリの卵白中のリゾチーム蛋白の3次元立体構造中の
水分子が中性子で見える

(先端基礎研究センター・新村グループ)

図3 中性子散乱研究の新たな展開
(例、ニワトリ卵白のリゾチーム構造解析)

[資料提供] 日本原子力研究所

核破砕消滅処理

消滅処理とは、毒性が強いあるいは毒性が長期にわたる放射性核種に中性子等を照射し、核変換を行い、安定あるいは、半減期の短い核種に変えてしまうことで、核変換処理ともいう。以下の方法が研究開発の対象になっている。

- (1) 高速増殖炉またはアクチノイド専焼炉における中性子照射によるアクチノイドの消滅処理
- (2) 加速器の陽子照射によるアクチノイドの核破砕処理および未臨界炉との組み合わせによる加速器駆動(ADS)による消滅処理
- (3) 加速器のガンマ線照射によるセシウム、ストロチウム元素などの消滅処理

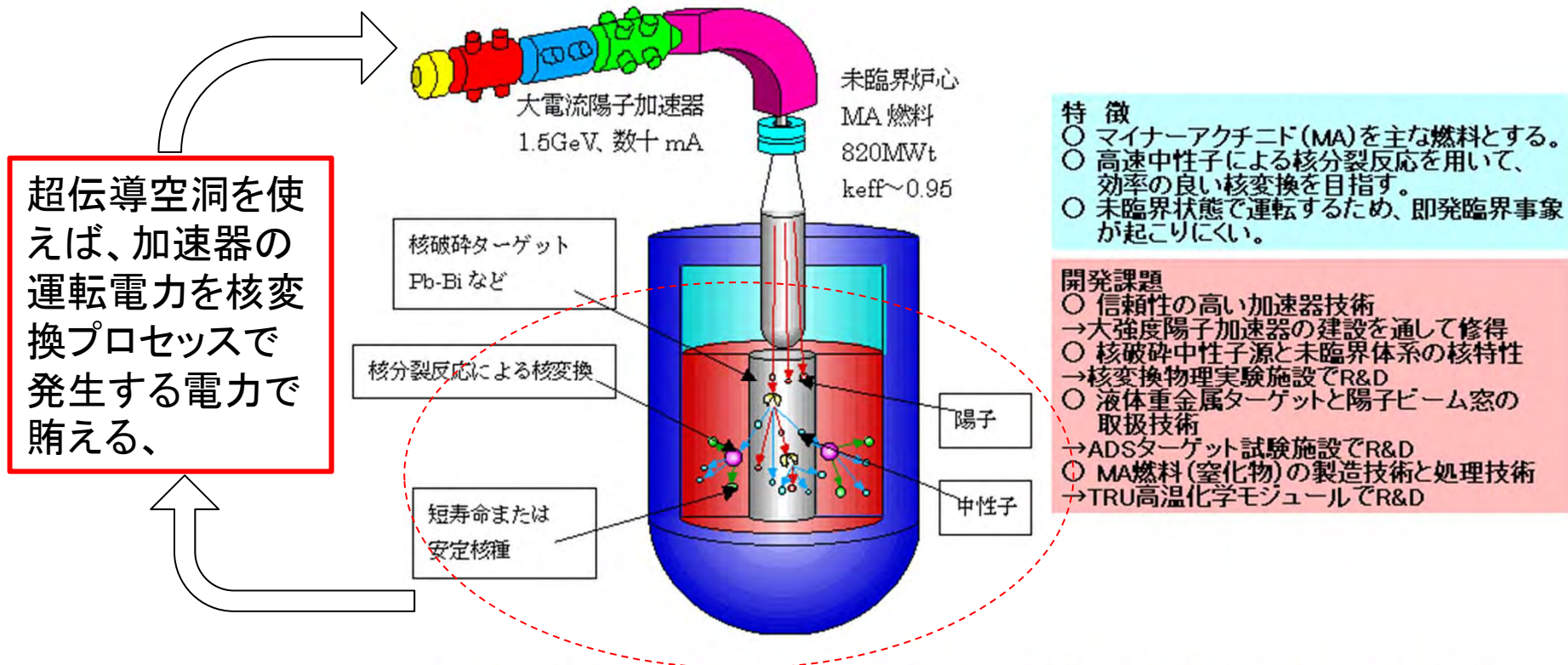


図2 陽子加速器による核破砕反応を利用した核変換システム概念

[資料提供] 日本原子力研究所

Spallation Neutron Source: SNS Project

Description	Accelerator	
Project Support	75.7	
Front End Systems	20.8	20.8
Linac Systems	304.9	304.9
Ring & Transfer System	147.3	147.3
Target Systems	106.4	
Instrument Systems	63.3	
Conventional Facilities	355.3	
Integrated Control Syst	59.6	59.6
BAC	1,133.3	
Contingency	59.4	
TEC	1,192.7	
R&D	101.2	81.0
Pre-Operations	117.8	94.2
TPC	1,411.7	707.8

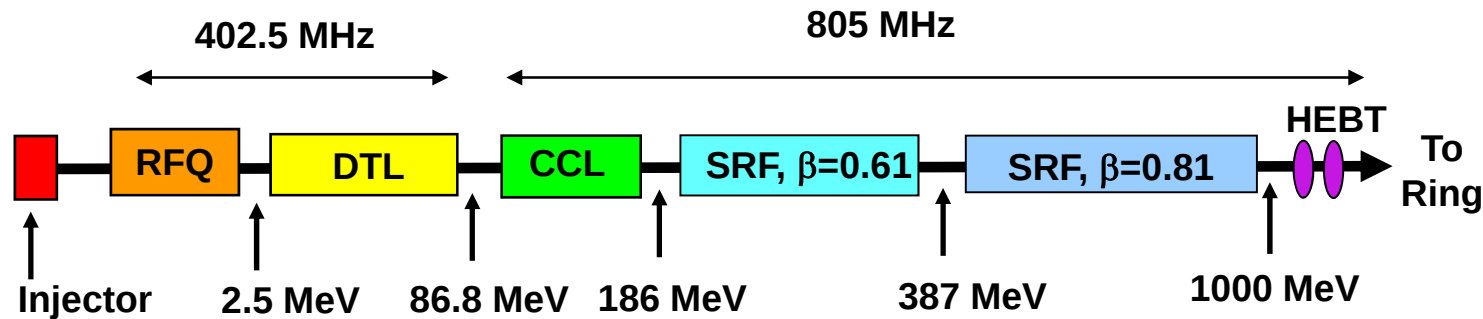
新しい中性子科学, 2006年にoperation start

At peak : ~500
People
worked on the
construction
of the SNS
accelerator



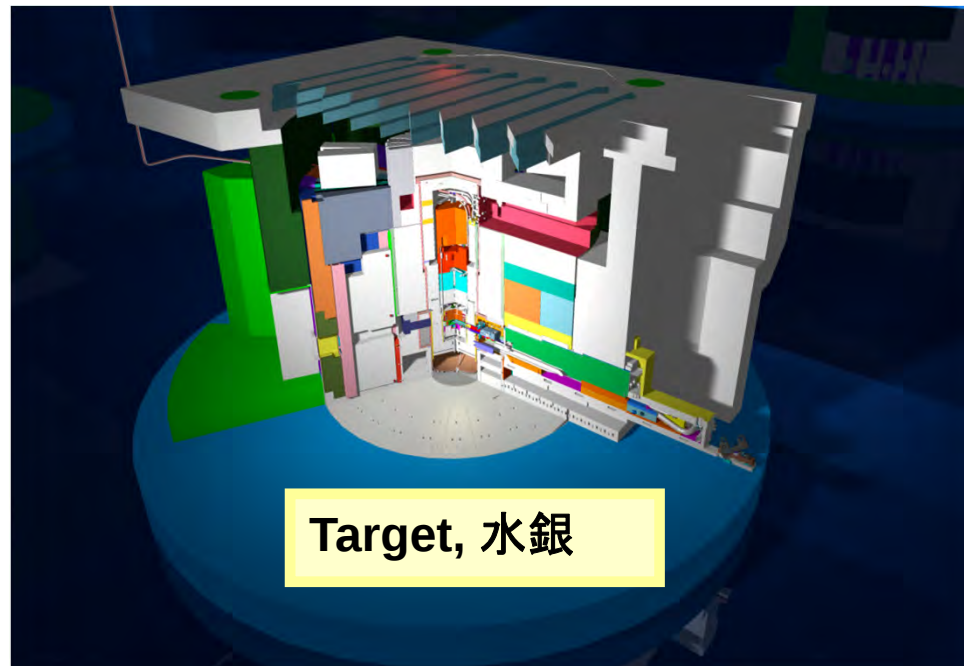
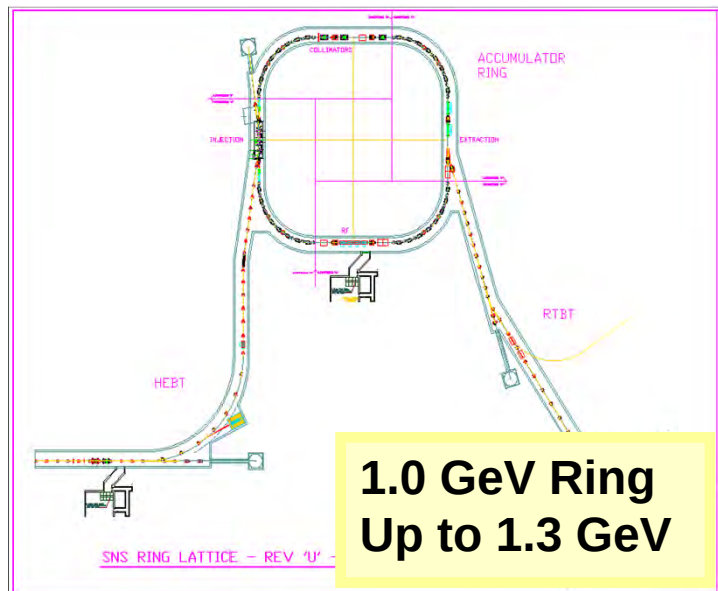
US 6 major 研究機関の共同プロジェクト

Accelerator complex of SNS



1 RFQ
6 DTL Tanks
4 CCL Modules

11 Medium- β Cryomodules - 3 Nb cavities each
12 High- β Cryomodules - 4 Nb cavities each



Overview of the SNS(Completed 2006)



Wide view of the SNS



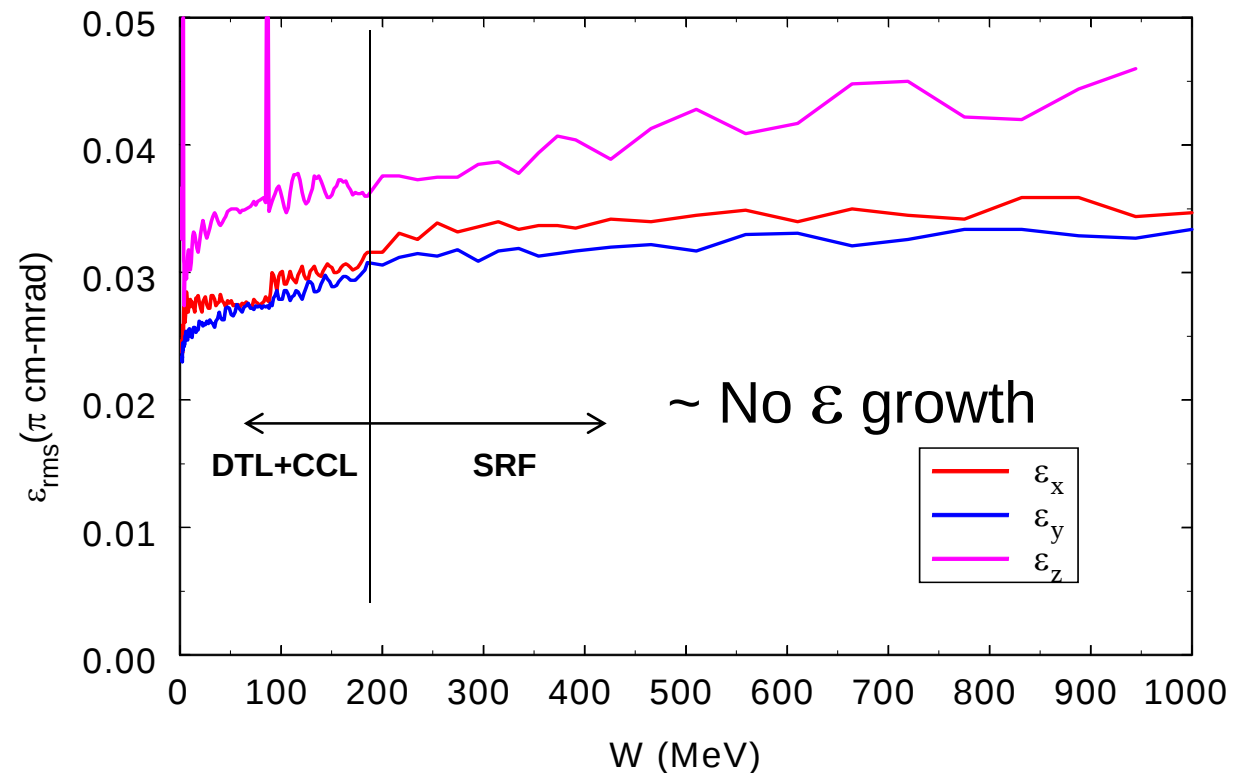
放射線による地下水汚染防止のために山の上に建設。

Why SC Proton LINAC ?

Superconducting RF Advantages:

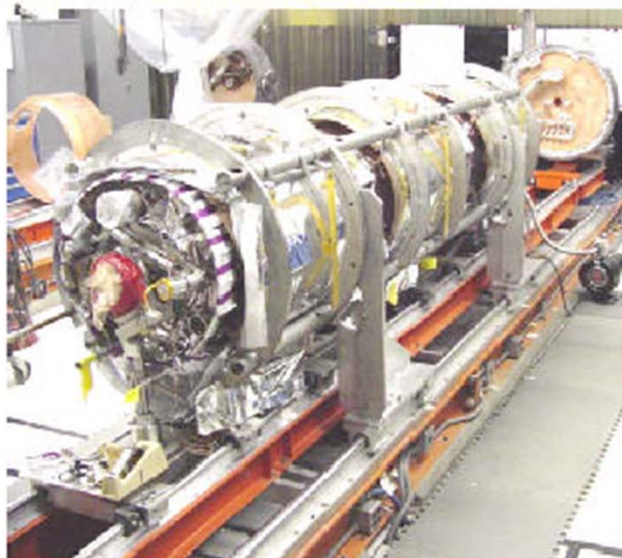
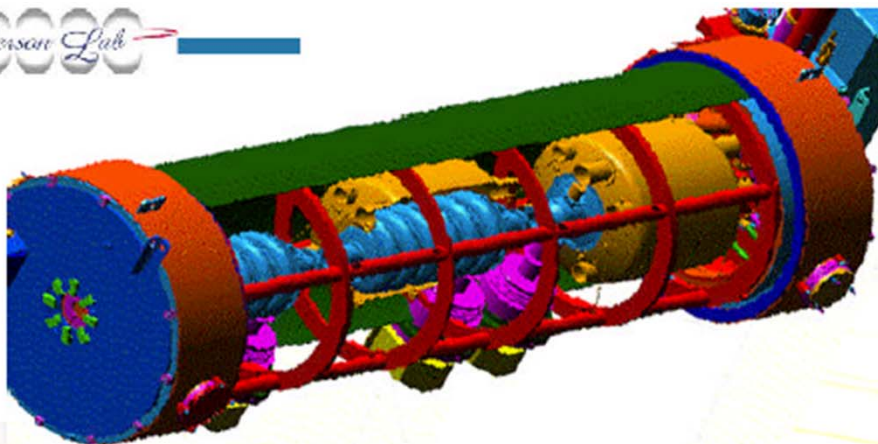
1. Flexibility → gradient and energy are not fixed
2. More power efficient → lower operational cost
3. High cavity fields → less real estate(土地建物)
4. Better vacuum → less gas stripping
5. Large aperture → less aperture restrictions → reduced beam loss
→ reduced activation

Medium β





SNS SC module production

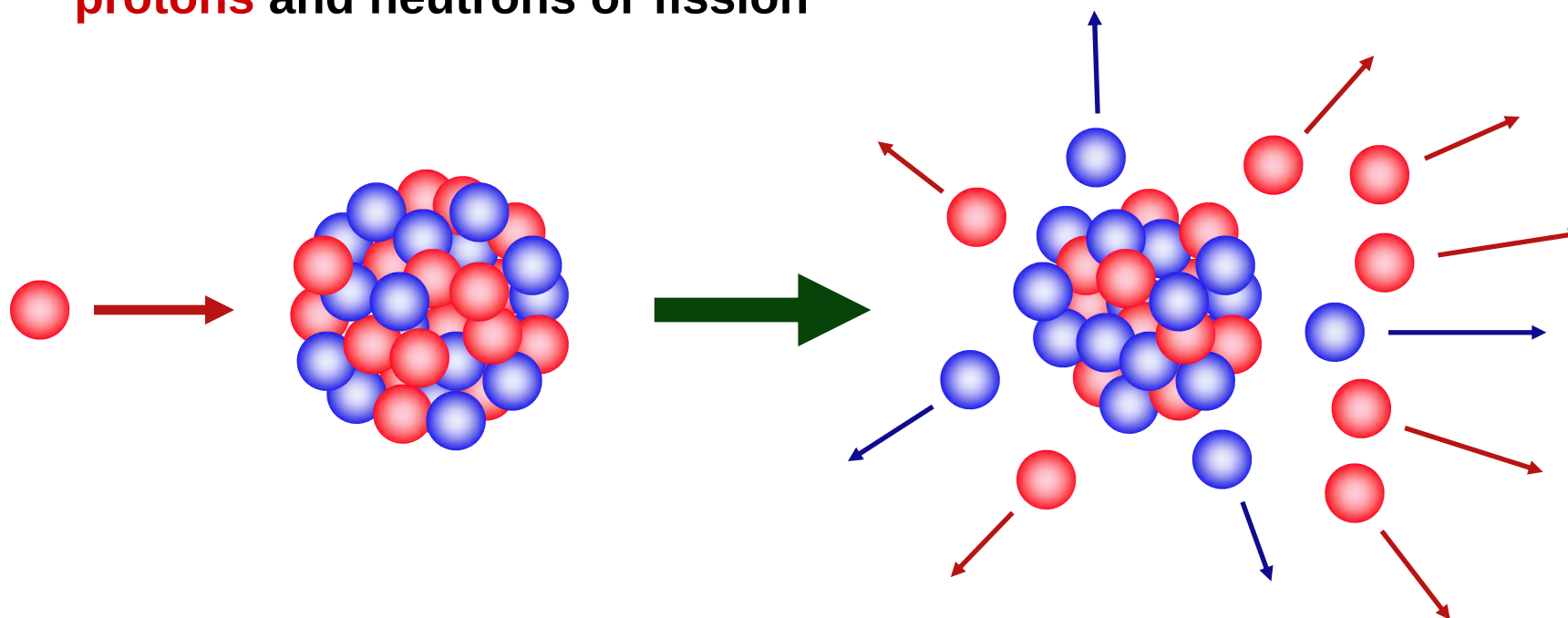


8 completed
6 cryomodules
installed at SNS

超伝導重イオン線形加速器 -例FRIB-

Production of Rare Isotopes at Rest Isotope Separation On Line (ISOL technique)

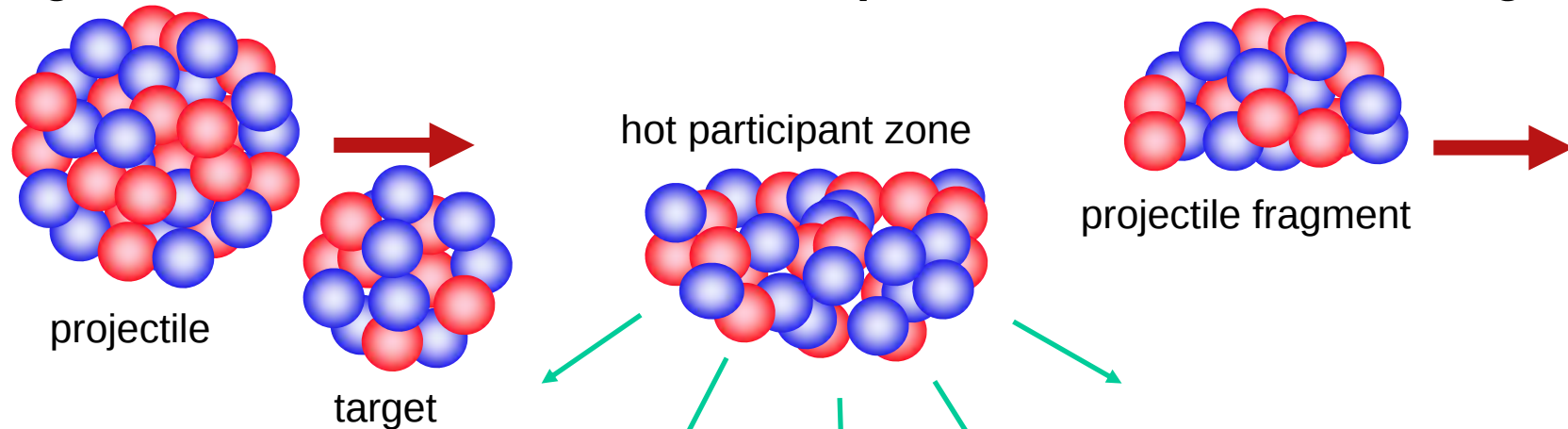
1. Bombard a thick target of heavy nuclei with energetic light particles, e.g. 1 GeV protons, to achieve random removal of **protons** and neutrons or fission



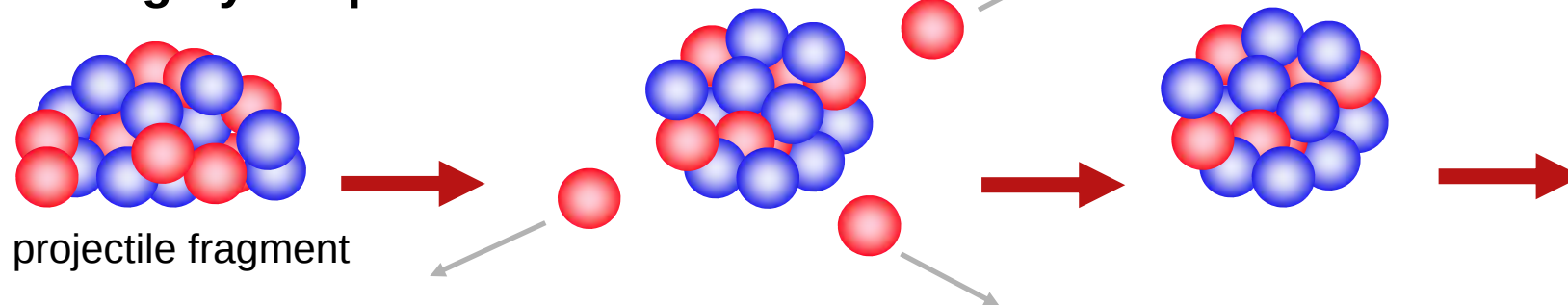
2. Extract rare isotopes from the target material by diffusion or effusion; ionize and accelerate them to the desired energy to get beam of high quality

Production of Rare Isotopes in Flight

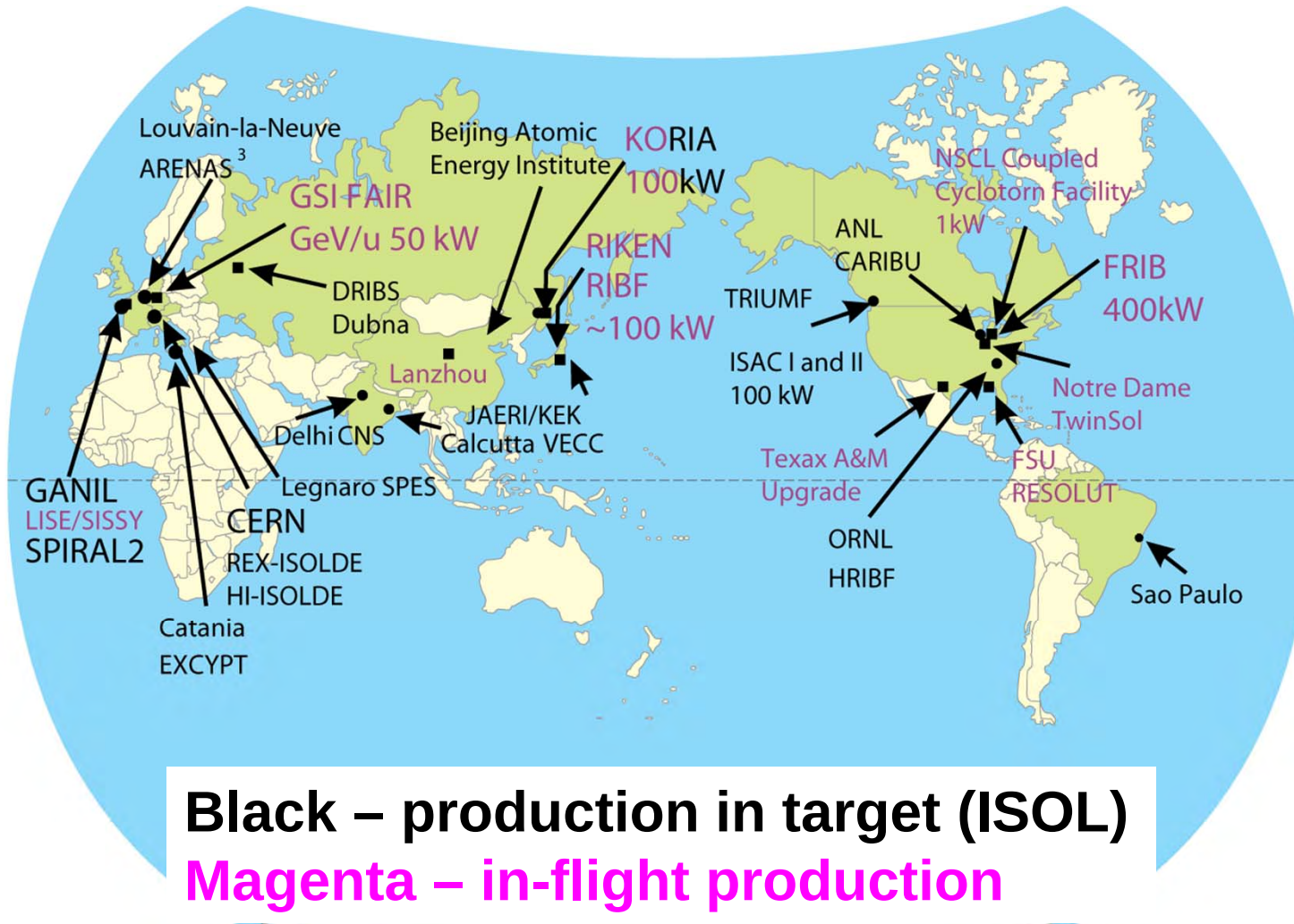
1. Accelerate heavy ion beam to high energy and pass through a thin target to achieve random removal of protons and neutrons in flight



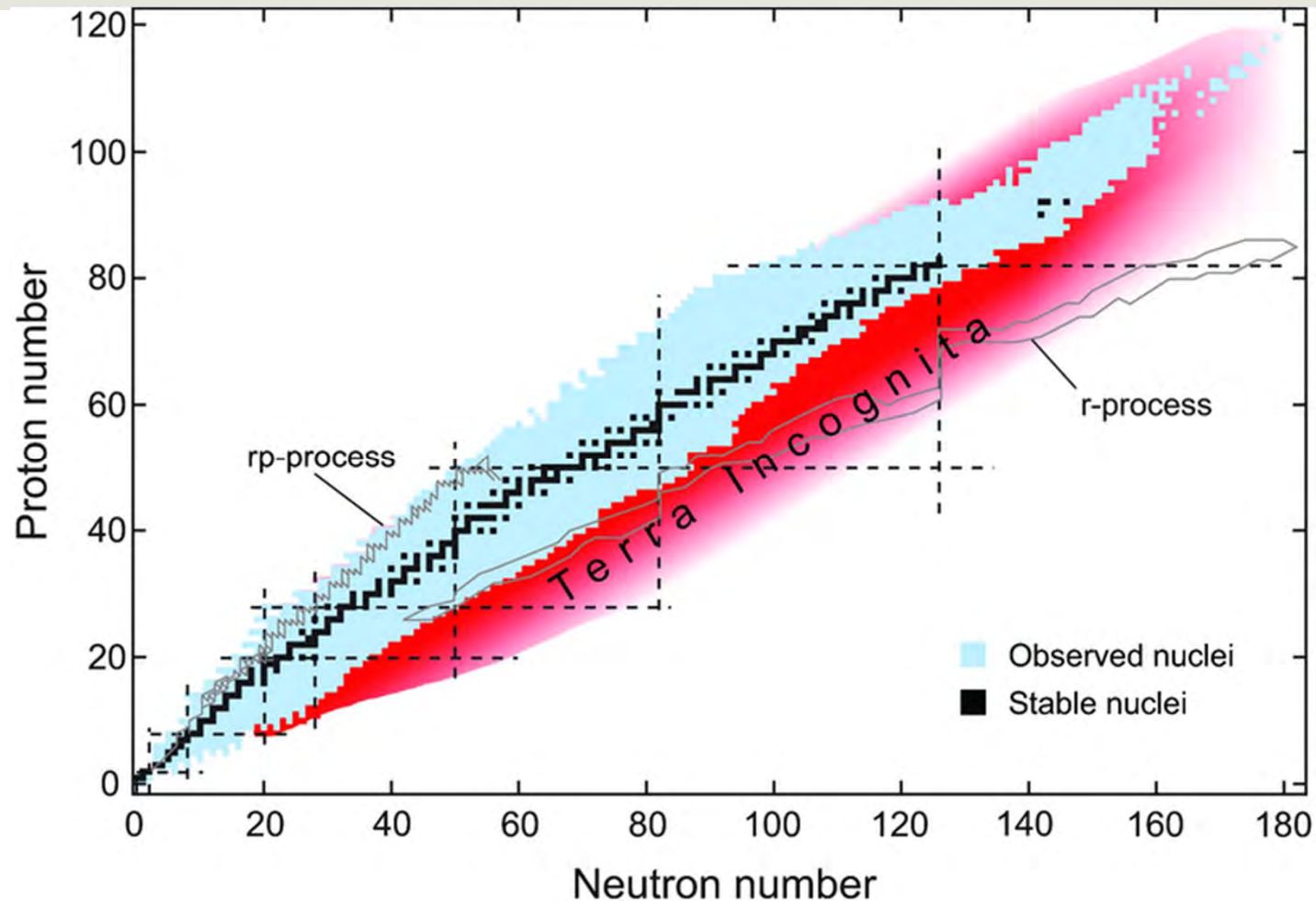
2. Cooling by evaporation



World View of Rare Isotope Facilities

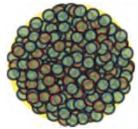


Domain of FRIB Research



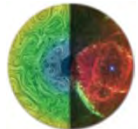
Gain factors of 10-10000 over operational facilities

The Four Themes of Research at FRIB



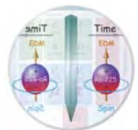
Properties of nuclei (nuclear structure)

- To develop a predictive model of nuclei and their interactions
- Study of many-body quantum physics: part of mesoscopic science – quantum dots, clusters of atoms, etc.



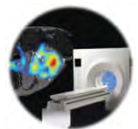
Nuclear processes in the universe

- Chemical history of the universe, (explosive) nucleo-synthesis
- Properties of neutron stars, EOS of asymmetric nuclear matter



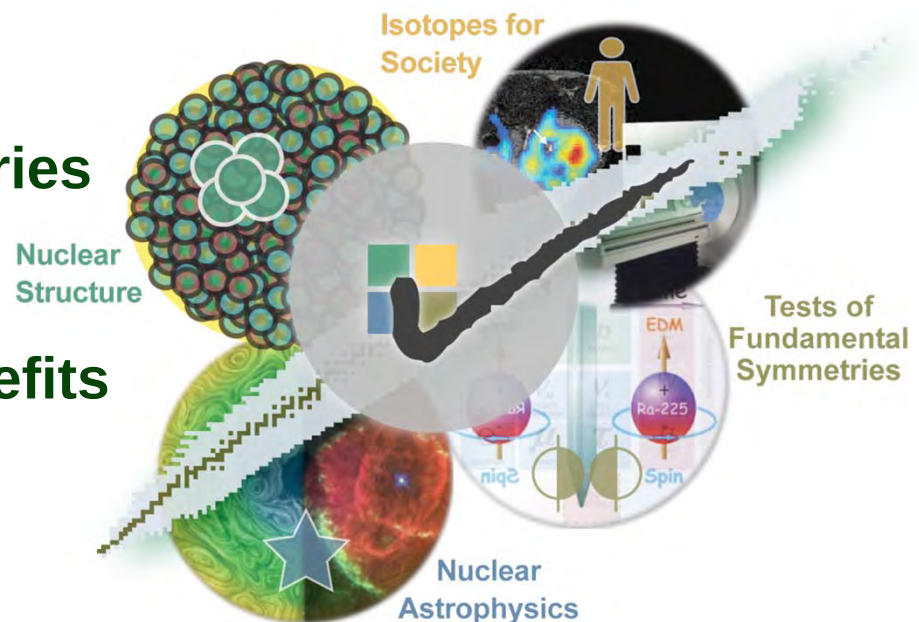
Tests of fundamental symmetries

- Effects of symmetry violations are amplified in certain nuclei



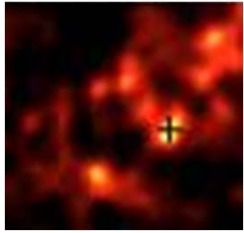
Societal applications and benefits

- Bio-medicine, energy, material sciences, national security



Nuclear Processes in the Universe

Important scientific questions FRIB addresses



- What is the origin of the elements in the cosmos?
 - Synthesis of neutron-rich nuclei heavier than iron: r-process

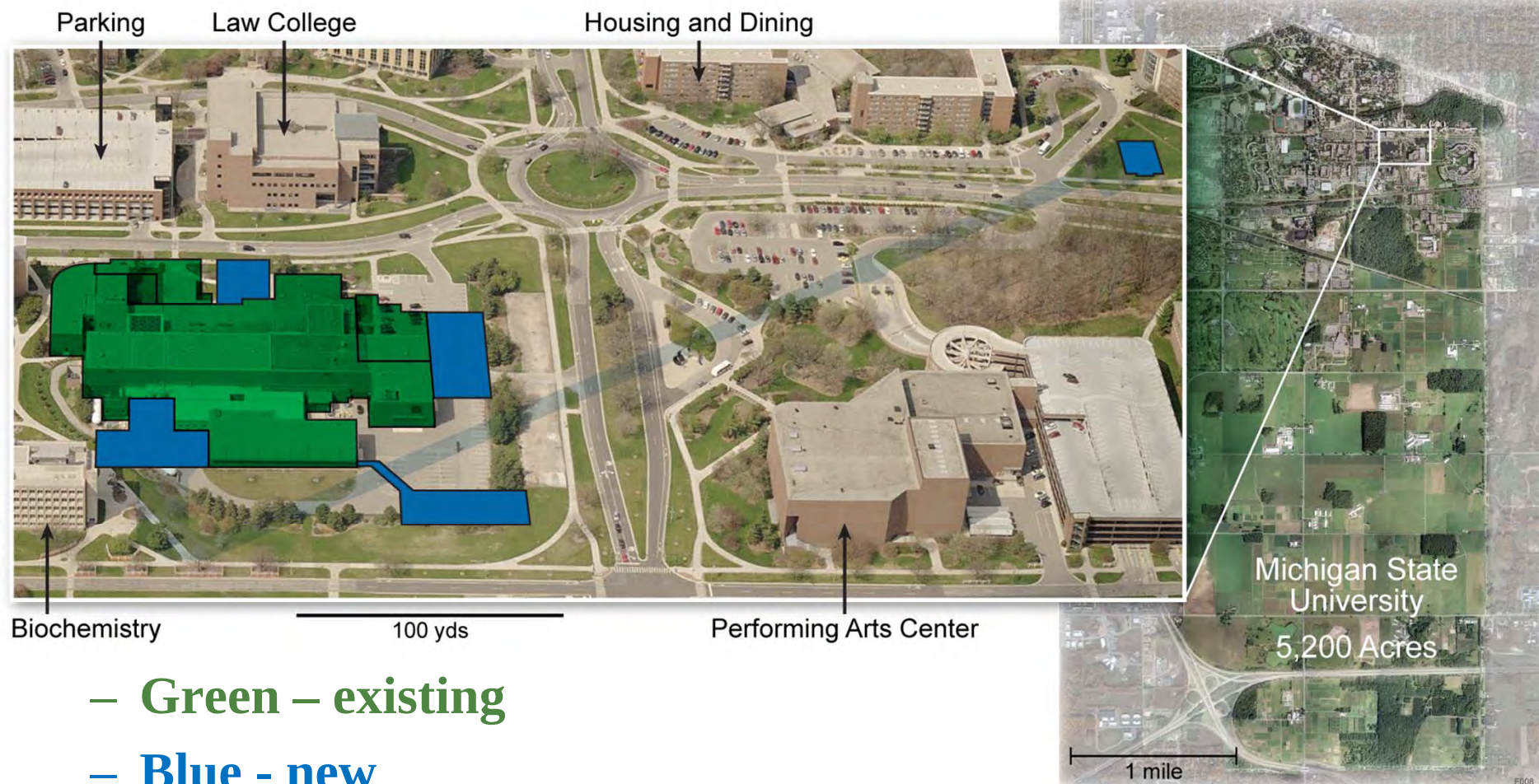


- Gamma-ray emitters in supernovae
- What are the nuclear reactions that drive stellar explosions?
 - Synthesis of proton-rich nuclei: rp-process
 - Weak interactions in supernovae



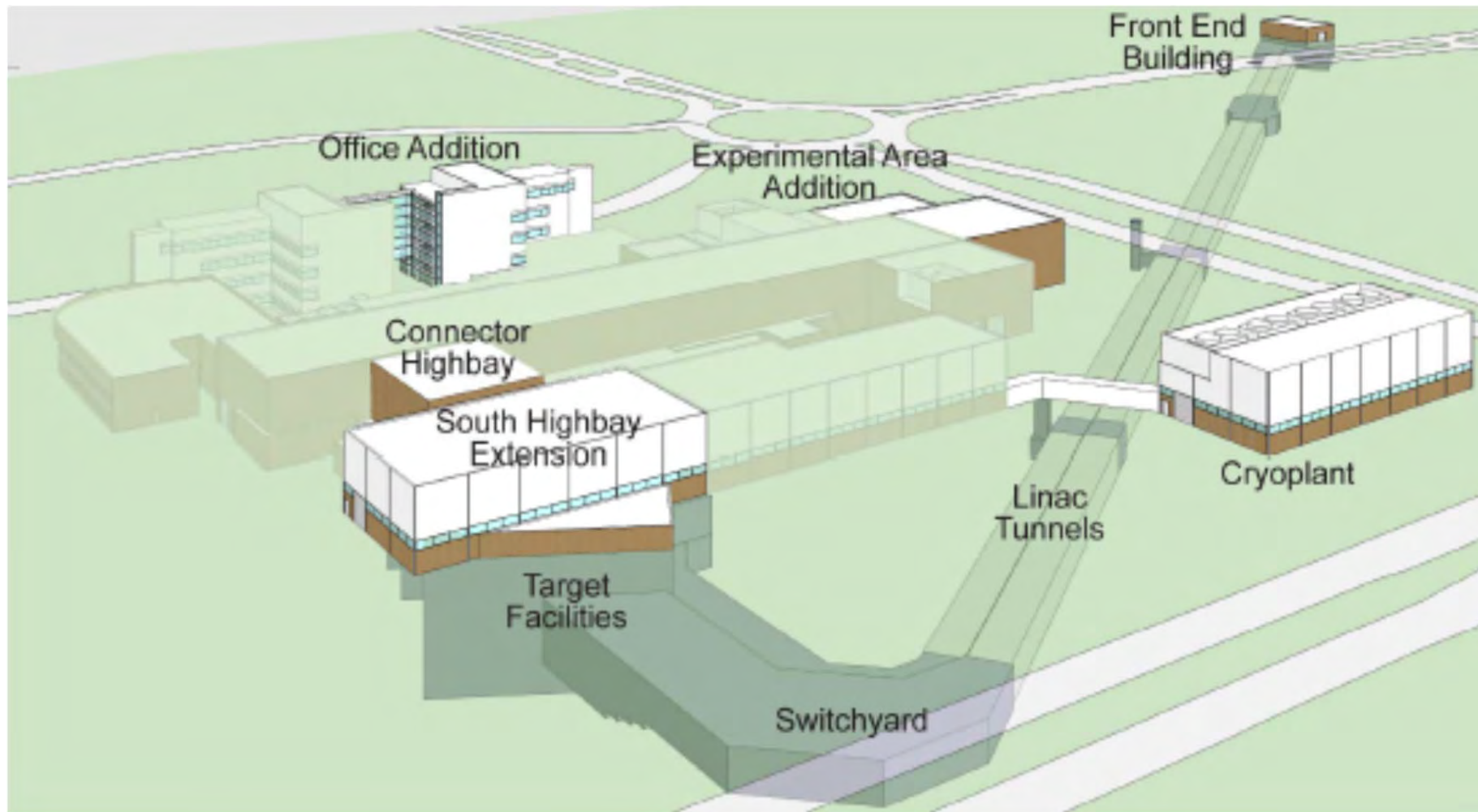
-
- What is the nature of neutron stars and dense nuclear matter?
 - Nuclear processes in the crusts of neutron stars
 - Symmetry energy term of equation of state of nuclear matter

Original FRIB Location on MSU Campus



MSU FRIB Proposal

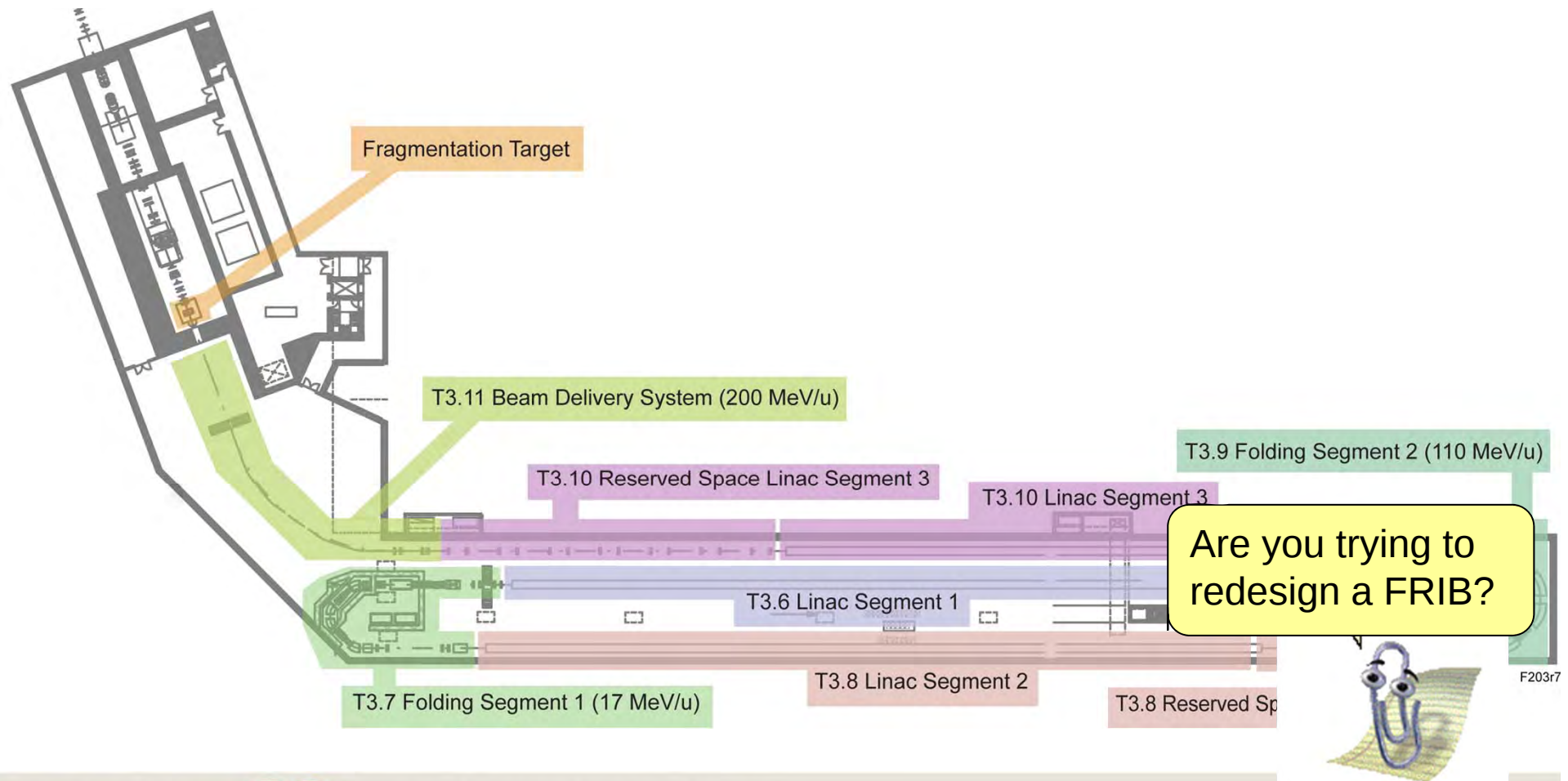
Two tunnels: linac tunnel and RF/service tunnel



Double-folded Linac

“Operation Paperclip”

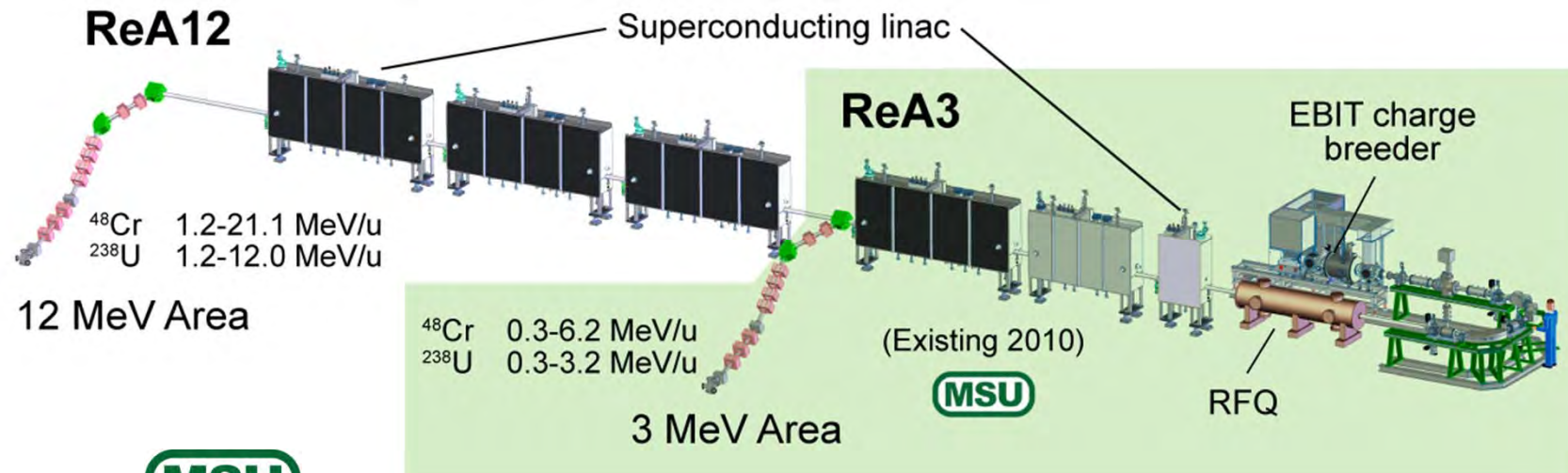
- Physically compact layout; minimize tunnel size; one tunnel for 3 linac segments



Facility for Rare Isotope Beams
U.S. Department of Energy Office of Science
Michigan State University

W. Hartung, 19 April 2010, Slide 110

Radioactive Ion-beam Reaccelerator



- **ReA3** **MSU**

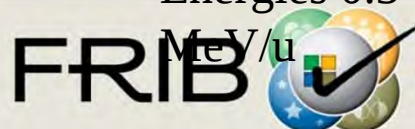
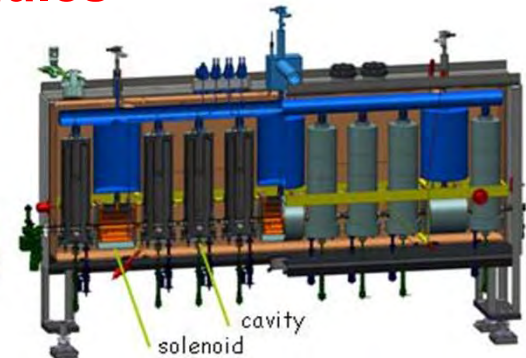
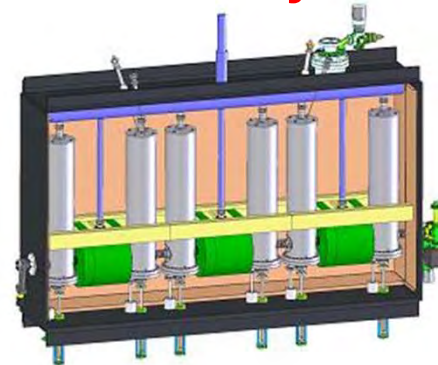
- High-intensity EBIT as $1+ \rightarrow n+$ charge breeder
- RT RFQ and SRF QWR cavities and cryomodules
- Energies 0.3 to 3 MeV/u

- **ReA12** - FRIB

- Energies 0.3 to 12

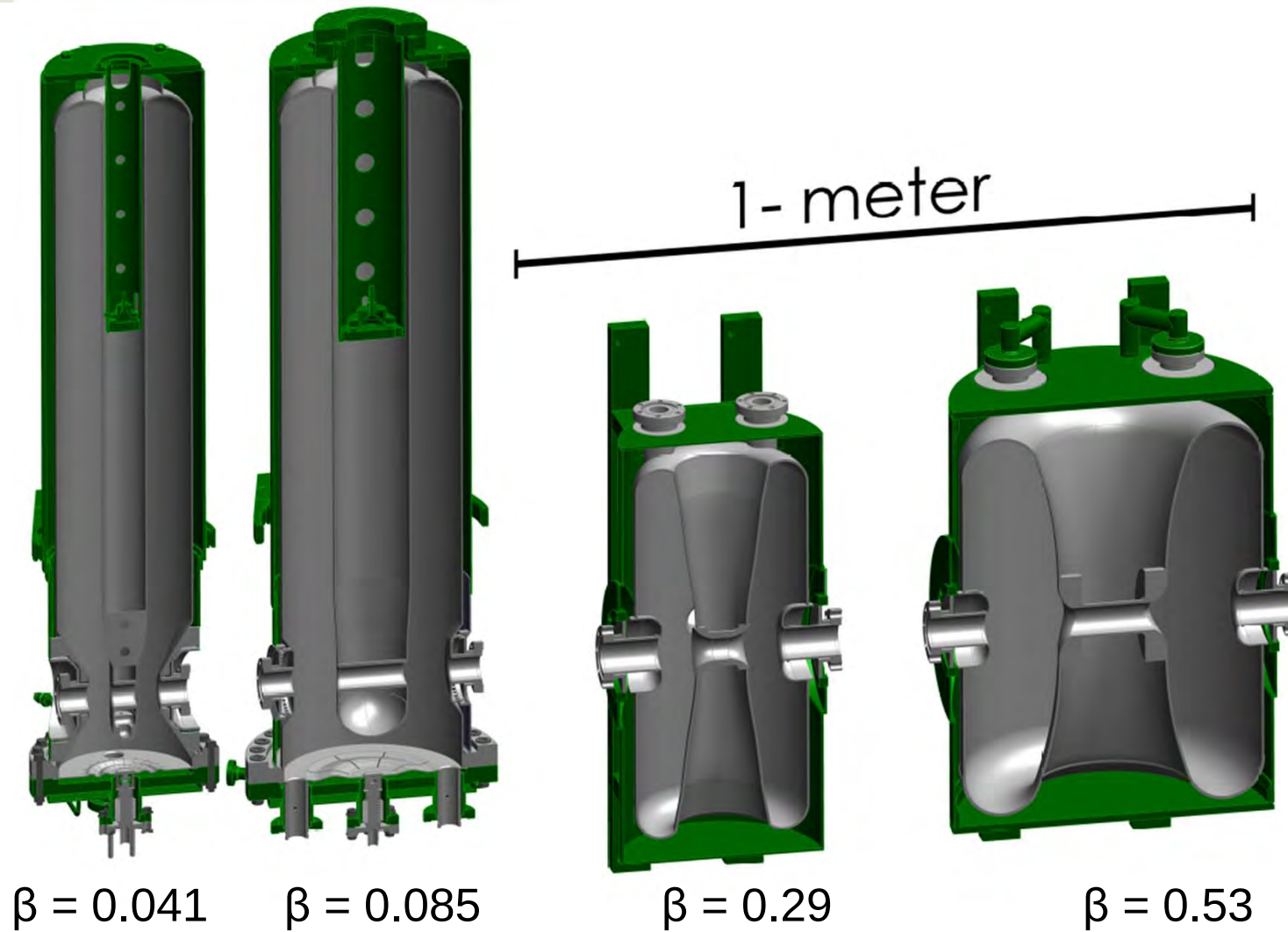


3 ReA3 Cryomodules



Facility for Rare Isotope Beams
 U.S. Department of Energy Office of Science
 Michigan State University

FRIB Resonators



Component Counts for FRIB Linac

Type	$\lambda/4$	$\lambda/4$	$\lambda/2$	$\lambda/2$	Total
β_{opt}	0.041	0.085	0.29	0.53	
Resonators	16 [0]	96 [2]	78 [4]	144 [4]	344
Solenoids	16 [0]	36 [0]	13 [2]	18 [2]	87
Cryomodules	4 [0]	12 [1]	13 [2]	18 [2]	52

= accelerating cryomodules

[#] = matching cryomodules

Plus 5 accelerating cryomodules and 4 matching cryomodules for Re-accelerator (ReA3 + ReA12)

$\beta = 0.041$ Resonators

Legnaro-style damper
TRIUMF-style tuning plate



Stiffening
elements



Resonator with helium
vessel, tuning plate, and
bottom flange

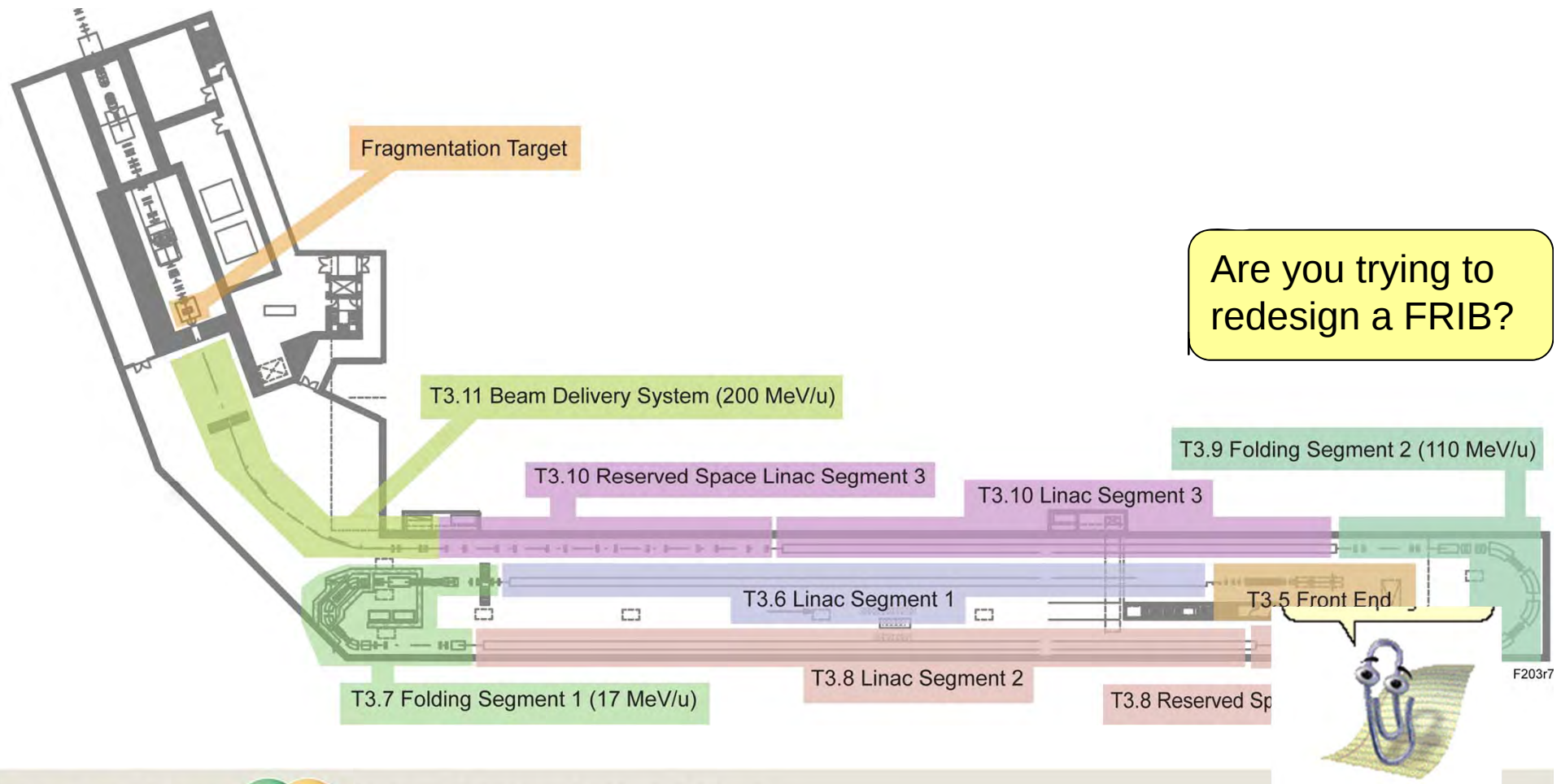


Prep for Dewar

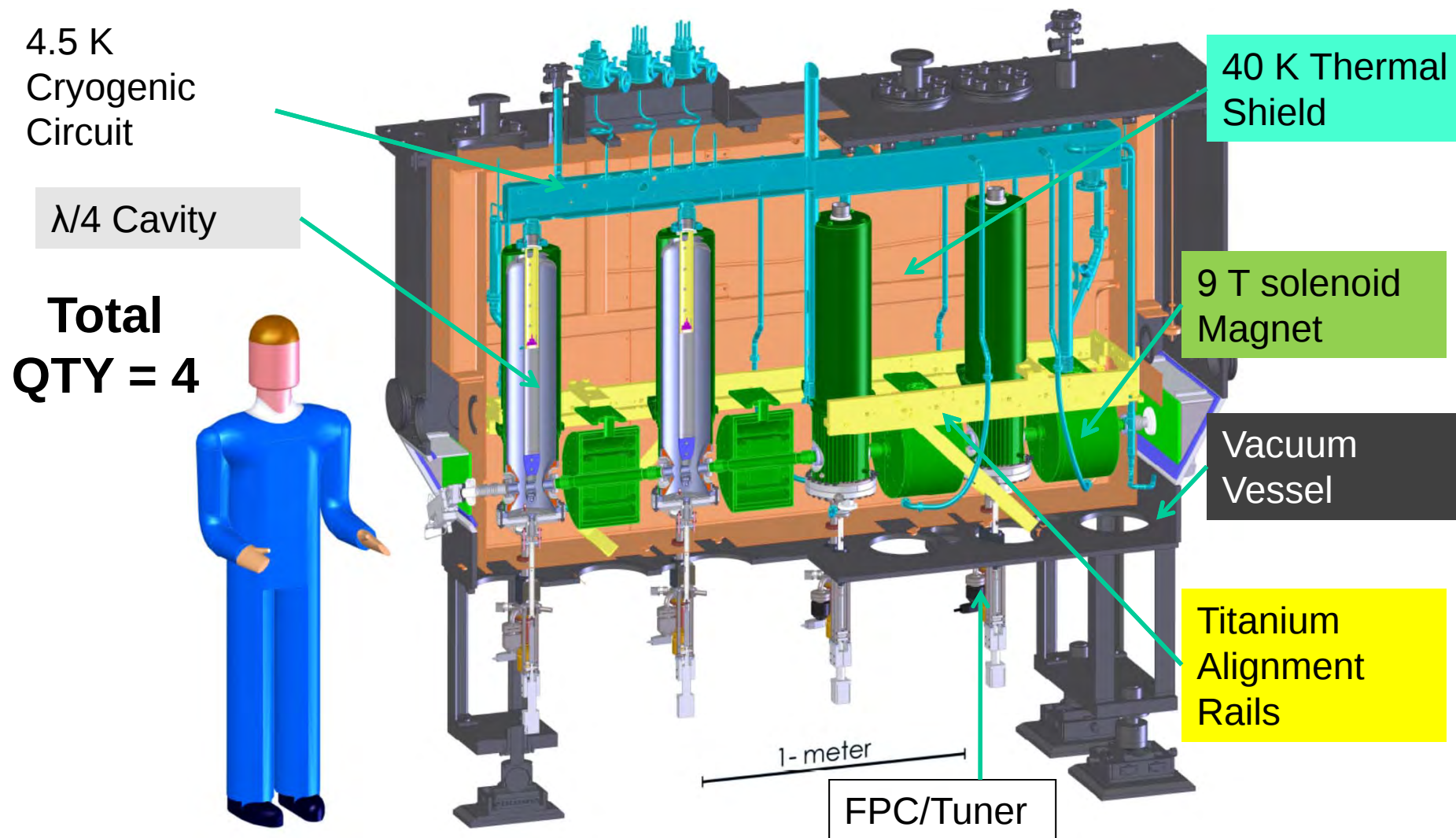


Double-folded Linac “Operation Paperclip”

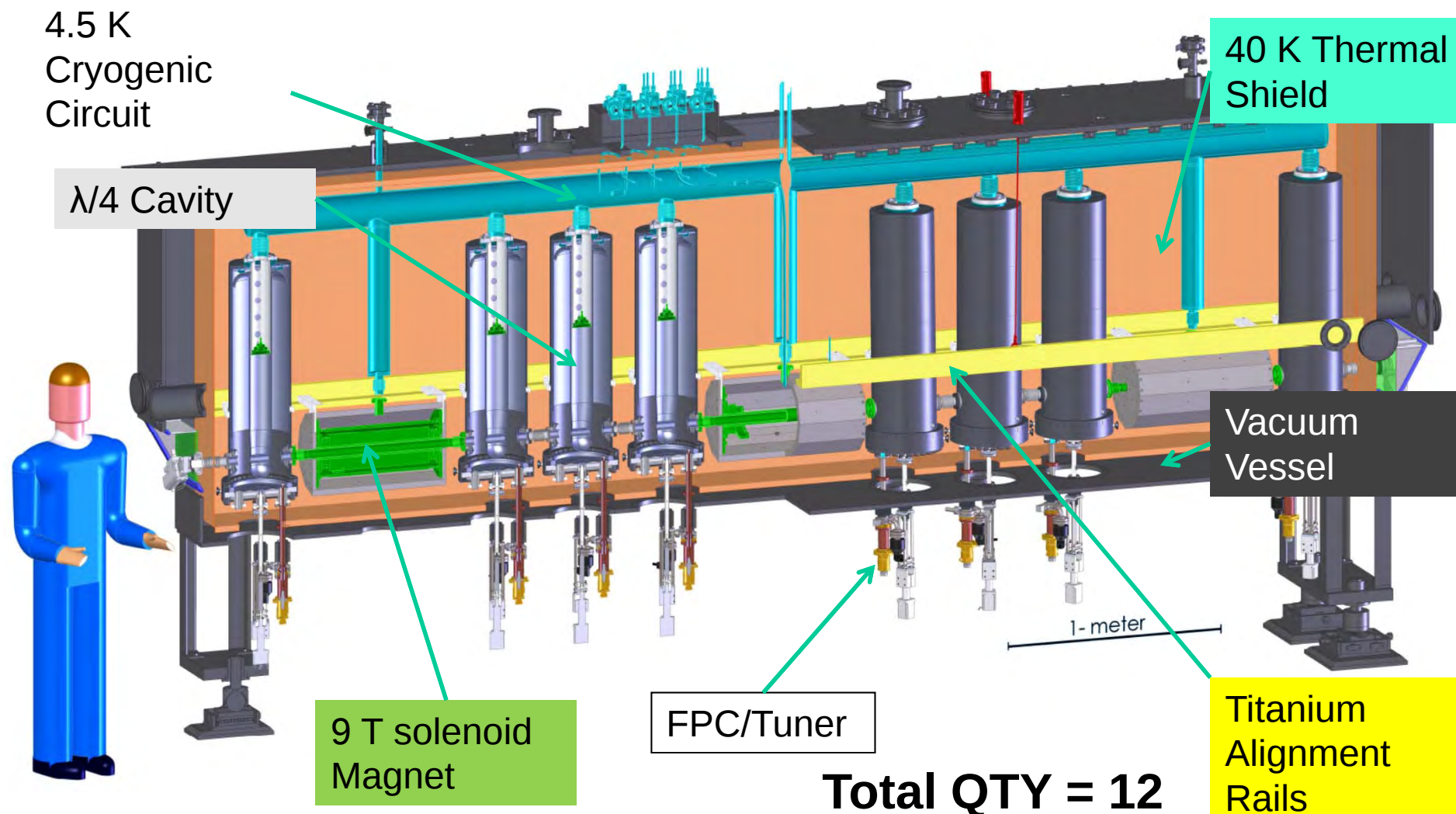
- Physically compact layout; minimize tunnel size; one tunnel for 3 linac segments



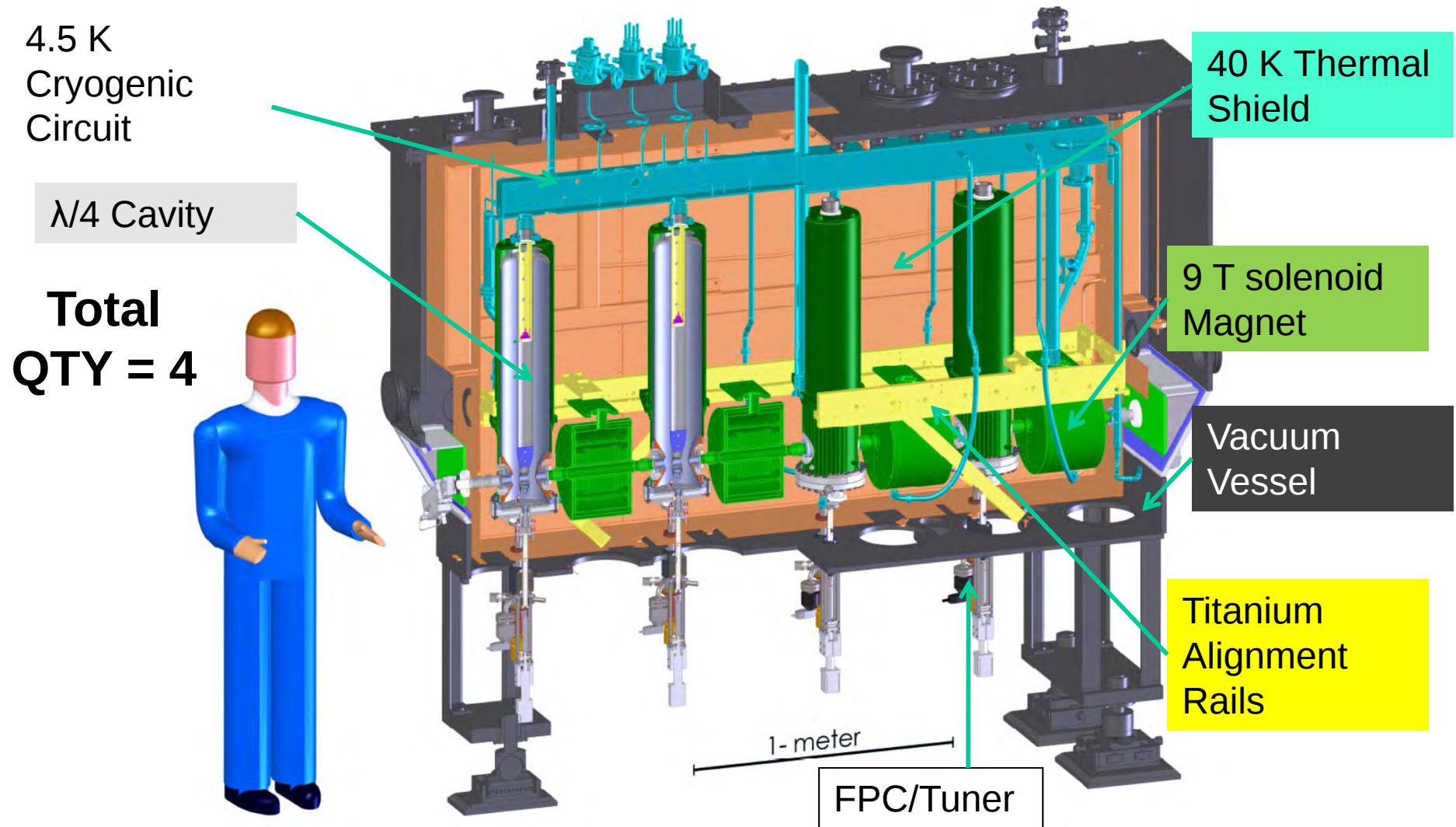
$$80.5 \text{ MHz } \beta = 0.041$$



80.5 MHz $\beta = 0.085$



$$80.5 \text{ MHz } \beta = 0.041$$



322 MHz $\beta = 0.29$

2 K
Cryogenic
Circuit

40 K Thermal
Shield



$\lambda/2$ Cavity

9 T solenoid
Magnet & 4.5
K Circuit

Vacuum
Vessel

Titanium
Alignment
Rails

Total QTY = 13



Facility for Rare Isotope Beams
U.S. Department of Energy Office of Science
Michigan State University

322 MHz $\beta = 0.53$

Total QTY = 18

